

FISIOLOGI TUMBUHAN: MEKANISME DAN REGULASI PERTUMBUHAN

Oktaviani, Juhardi Sembiring, Didi Carsidi, Alianto,
Hendri Satria Kamal Uyun, Nonci M. Uki, Saraswati Prabawardani,
Abdullah Sarijan, Muhammad Ridhwan



FISIOLOGI TUMBUHAN: MEKANISME DAN REGULASI PERTUMBUHAN

**Oktaviani
Juhardi Sembiring
Didi Carsidi
Alianto
Hendri Satria Kamal Uyun
Nonci M. Uki
Saraswati Prabawardani
Abdullah Sarijan
Muhammad Ridhwan**



GET PRESS INDONESIA

FISIOLOGI TUMBUHAN: MEKANISME DAN REGULASI PERTUMBUHAN

Penulis :

Oktaviani
Juwardi Sembiring
Didi Carsidi
Alianto
Hendri Satria Kamal Uyun
Nonci M. Uki
Saraswati Prabawardani
Abdullah Sarijan
Muhammad Ridhwan

ISBN : 978-623-125-588-4

Editor : Dr. Oktavianis, M.Biomed.

Penyunting : Mila Sari., S.ST, M.Si

Desain Sampul dan Tata Letak : Atyka Trianisa, S.Pd

Penerbit : GET PRESS INDONESIA

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :

Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www.getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, Januari 2025

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan
dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Fisiologi Tumbuhan: Mekanisme Dan Regulasi Pertumbuhan ini.

Buku Ini Membahas Konsep Dasar Fisiologi Tumbuhan Dan Hubungannya Dengan Ilmu-ilmu Lain, Sifat-sifat Air Dan Larutan, Hubungan Air Dengan Tumbuhan, Proses Fotosintesis, Proses Respirasi, Proses Pertumbuhan Dan Perkembangan Tumbuhan, Hormon Dan Zat Pengatur Tumbuh Pada Tumbuhan, Kekuatan Gerak Yang Terjadi Pada Tanaman, Mekanisme dan Regulasi Pertumbuhan Tanaman.

Proses penulisan buku ini berhasil diselesaikan atas kerjasama tim penulis. Demi kualitas yang lebih baik dan kepuasan para pembaca, saran dan masukan yang membangun dari pembaca sangat kami harapkan.

Penulis ucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung dalam penyelesaian buku ini. Terutama pihak yang telah membantu terbitnya buku ini dan telah mempercayakan mendorong, dan menginisiasi terbitnya buku ini. Semoga buku ini dapat bermanfaat bagi masyarakat Indonesia.

Padang, Desember 2024

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
BAB 1 PENGANTAR FISILOGI TUMBUHAN.....	1
1.1 Definisi Fisiologi Tumbuhan	1
1.1.1 Ruang Lingkup Studi dan Pentingnya Fisiologi Tumbuhan dalam Pertumbuhan.....	1
1.1.2 Hubungan antara Fisiologi dan Ekologi	4
1.2 Struktur dan Fungsi Sel Tumbuhan	4
1.2.1 Organisasi Sel Tumbuhan.....	4
1.2.2 Plastida dan Perannya dalam Metabolisme.....	7
1.2.3 Peran Dinding Sel dalam Pertumbuhan.....	9
1.3 Regulasi Pertumbuhan oleh Hormon Tumbuhan.....	9
1.3.1 Mekanisme Kerja Hormon pada Tingkat Molekuler dan Seluler.....	13
1.3.2 Interaksi Antar Hormon dalam Mengatur Pertumbuhan	14
1.4 Proses Fotosintesis dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan	14
1.4.1 Pengaruh Hasil Fotosintesis pada Pertumbuhan dan Perkembangan.....	15
1.5 Respirasi dan Produksi Energi.....	16
1.5.1 Jalur Metabolisme Respirasi	16
1.5.2 Hubungan antara Respirasi dan Pertumbuhan Sel.....	18
1.6 Transportasi Nutrisi dan Air dalam Tumbuhan	19
1.6.1 Mekanisme Transportasi Air	20
1.6.2 Penyerapan dan Distribusi Unsur Hara Esensial	21
1.6.3 Hubungan Transportasi Nutrisi dengan	

Mekanisme Pertumbuhan.....	21
1.7 Regulasi Genetik dalam Pertumbuhan Tumbuhan	23
17.1 Ekspresi Gen yang Mengatur Pertumbuhan dan Diferensiasi	23
1.7.2 Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Regulasi Genetik.....	23
1.7.3 Peran Epigenetik dalam Adaptasi dan Pertumbuhan	25
1.8 Respon Tumbuhan terhadap Faktor Lingkungan.....	26
1.8.1 Mekanisme Adaptasi terhadap Stres Lingkungan.....	27
1.8.2 Regulasi Hormon dalam Dormansi Biji dan Kuncup	28
DAFTAR PUSTAKA	30
BAB 2 SIFAT-SIFAT AIR DAN LARUTAN	33
2.1 Pendahuluan	33
2.2 Hubungan Air dan Tumbuhan.....	33
2.2.1 Proses Fotosintesis	34
2.2.2 Transpirasi.....	34
2.2.3 Penyerapan Nutrisi.....	35
2.2.4 Turgor Sel.....	35
2.2.5 Pengaturan Kelembapan	36
2.3 Sifat-sifat Air yang Berperan pada Tumbuhan.....	36
2.3.1 Kohesi	37
2.3.2 Adhesi.....	37
2.3.3 Memiliki Polaritas.....	37
2.3.4 Permukaan Tegangan	37
2.3.5 Kemampuan Melarutkan Zat	38
2.4 Sifat Larutan pada Tumbuhan	38
2.4.1 Konsentrasi Larutan.....	39
2.4.2 Tegangan Permukaan	39
2.4.3 Osmosis.....	39

2.4.4 Tekanan Turgor	39
2.4.5 pH Larutan	39
2.4.6 Larutan Nutrisi.....	40
DAFTAR PUSTAKA.....	41
BAB 3 HUBUNGAN AIR DENGAN TUMBUHAN	43
3.1 Pendahuluan.....	43
3.2 Peran Air dalam Fisiologi Tumbuhan	43
3.2.1 Sebagai Pelarut dan Media Transportasi.....	43
3.2.2 Fotosintesis.....	44
3.2.3 Menjaga Turgiditas dan Struktur sel.....	45
3.2.4 Pengatur Suhu.....	46
3.3 Siklus Air di Tumbuhan.....	46
3.4 Stres air pada Tumbuhan.....	47
3.5 Adaptasi Tumbuhan terhadap Kekurangan Air.....	48
3.5.1 Perubahan Morfologi Daun	49
3.5.2 Sistem Akar yang Dalam	49
3.6 Interaksi antara, air dan Tumbuhan.....	49
3.7 Pengelolaan Air dalam Pertanian.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	52
BAB 4 PROSES FOTOSINTESIS	53
4.1 Pendahuluan.....	53
4.2 Asal Usul Kata Fotosintesis	54
4.3 Organisme Pelaku Fotosintesis.....	54
4.4 Proses Fotosintesis Secara Umum.....	55
4.4.1 Absorpsi Cahaya Dalam Fotosintesis.....	56
4.4.2 Reaksi Terang Dalam Fotosintesis	57
4.4.3 Reaksi Gelap Dalam Fotosintesis.....	60
DAFTAR PUSTAKA.....	63
BAB 5 RESPIRASI	65
5.1 Respirasi	65
5.1.1 Kuosien Respirasi (Respiratory quotient)	66
5.2 Pembentukan Gula heksosa.....	66

5.3 Glikolisis	68
5.4 Dekarboksilasi Oksidatif	74
5.5 Siklus Krebs	75
5.6 Transpor Elektron	80
5.7 Fermentasi	82
DAFTAR PUSTAKA	83
BAB 6 PROSES PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN TUMBUHAN	85
6.1 Pendahuluan	85
6.2 Pengertian Pertumbuhan dan Perkembangan	86
6.3 Perbedaan antara Pertumbuhan dan Perkembangan pada Tumbuhan.....	86
6.4 Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan	89
6.4.1 Faktor Internal.....	89
6.4.2 Faktor Eksternal.....	90
6.5 Tahapan Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan	91
6.5.1 Perkecambahan	91
6.5.2 Pertumbuhan	95
6.5.3 Fase Reproduksi	99
DAFTAR PUSTAKA	101
BAB 7 HORMON DAN ZAT PENGATUR TUMBUH	103
7.1 Pendahuluan	103
7.2 Jenis-jenis Hormon Tanaman.....	104
7.2.1 Auksin.....	104
7.2.2 Giberelin.....	107
7.2.3 Sitokinin	111
7.2.4 Etilen	113
7.2.5 Asam Absisat (ABA)	114
7.3 Penutup	116
DAFTAR PUSTAKA	117

BAB 8 KEKUATAN GERAK YANG TERJADI	
PADA TUMBUHAN	125
8.1 Pendahuluan.....	125
8.2 Memahami Kekuatan Gerak pada Tanaman.....	126
8.2.1 Gerak Endonom.....	126
8.2.2 Gerak Higroskopis	128
8.2.3 Gerak Tropisme.....	130
8.2.4 Gerakan Nasti	133
8.2.5 Gerak Taksis	136
8.3 Aktivitas Transpirasi Terkait Gerakan pada Tanaman	141
DAFTAR PUSTAKA.....	144
BAB 9 MEKANISME DAN REGULASI PERTUMBUHAN	
TANAMAN	147
9.1 Pendahuluan.....	147
9.2 Mekanisme Pertumbuhan Tanaman.....	148
9.3 Regulasi Pertumbuhan Tanaman.....	152
9.4 Interaksi Faktor Hormon dan Lingkungan	170
DAFTAR PUSTAKA.....	173
BIODATA PENULIS	

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1. Total ATP yang dihasilkan Pada Respirasi Aerob	81
Tabel 6.1. Perbedaan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan	86
Tabel 6.2. Persamaan antara Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan.....	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Ilustrasi Proses Penguapan air pada tumbuhan	35
Gambar 3.1. Proses Transpirasi	44
Gambar 3.2. Proses Fotosintesis	45
Gambar 3.3. Mekanisme Cekaman Kekeringan	46
Gambar 3.4. Kandungan Air Tanah	50
Gambar 4.1. Reaksi terang dan gelap dalam fotosintesis	56
Gambar 4.2. Siklus biokimia dalam proses fotosintesis	59
Gambar 4.3. Siklus Calvin yang memperlihatkan reduksi karbon dalam fotosintesis	61
Gambar 5.1. Reaksi Respirasi dengan substrat glukosa	65
Gambar 5.2. Amilosa dan Amilopektin	68
Gambar 5.3. Reaksi Glikolisis	69
Gambar 5.4. Reaksi Fosforilasi Glukosa pada Reaksi Glikolisis	70
Gambar 5.5. Reaksi Isomerasi Glukosa pada Reaksi Glikolisis	70
Gambar 5.6. Reaksi Fosforilasi Glukosa pada Glikolisis	71
Gambar 5.7. Reaksi Lisis Glukosa pada Glikolisis	71
Gambar 5.8. Reaksi Isomerasi Glukosa pada Glikolisis	72
Gambar 5.9. Reaksi Oksidasi dan Fosforilasi Glukosa pada Glikolisis	72
Gambar 5.10. Reaksi Defosforilasi Glukosa pada Glikolisis	73
Gambar 5.11. Reaksi Isomerasi Glukosa pada Glikolisis	73
Gambar 5.12. Reaksi Dehidrasi Glukosa pada Glikolisis	74
Gambar 5.13. Defosforilasi Isomerasi Glukosa pada Glikolisis Reaksi akhir Glikolisis adalah 2 molekul NADH, 2 molekul Asam Piruvat dan 2 molekul ATP	74
Gambar 5.14. Dekarboksilasi Oksidatif	75
Gambar 5.15. Reaksi Tahap 1 pada Siklus Krebs	76
Gambar 5.16. Reaksi Tahap 2 pada Siklus Krebs	76
Gambar 5.17. Reaksi Tahap 3 pada Siklus Krebs	77

Gambar 5.18. Reaksi Tahap 4 pada Siklus Krebs.....	77
Gambar 5.19. Reaksi Tahap 5 pada Siklus Krebs.....	78
Gambar 5.20. Reaksi Tahap 6 pada Siklus Krebs.....	78
Gambar 5.21. Reaksi Tahap 7 pada Siklus Krebs.....	78
Gambar 5.22. Reaksi Tahap 8 pada Siklus Krebs.....	79
Gambar 5.23. Siklus Krebs Secara lengkap	79
Gambar 5.24. Perubahan NADH menjadi ATP	80
Gambar 5.25. Perubahan FADH ₂ menjadi ATP	81
Gambar 5.26. Reasi Anaerob	82
Gambar 6.1. Perkecambahan Epigeal	94
Gambar 6.2. Perkecambahan Hipogeal	94
Gambar 6.3. Pertumbuhan Primer.....	95
Gambar 6.4. Pertumbuhan Primer pada Akar.....	96
Gambar 6.5. Pertumbuhan Primer pada Ujung Batang	97
Gambar 6.6. Pertumbuhan Sekunder pada Batang.....	98
Gambar 8.1. Pergerakan dalam kloroplas.....	126
Gambar 8.2. Pergerakan akar dan batang.....	127
Gambar 8.3. Gerakan endonom pada bunga	128
Gambar 8.4. Pecahnya polong akibat penurunan kadar air.....	129
Gambar 8.5. Membuka dan menutupnya daun putri malu	129
Gambar 8.6. Pembelokan akar menuju sumber air	130
Gambar 8.7. Membeloknya pucuk tunas ke arah matahari.....	131
Gambar 8.8. Pertumbuhan akar kearah bawah	131
Gambar 8.9. Lilitan sulur pada tonggak kayu	132
Gambar 8.10. Pertumbuhan akar kearah adanya air	132
Gambar 8.11. Gerak akar ketempat adanya unsur hara.....	133
Gambar 8.12. Gerak tidur daun pohon turi.....	132
Gambar 8.13. Gerak fotonasti pada bunga pukul empat.....	134
Gambar 8.14. Mengatupnya daun Mimosa Pudica akibat sentuhan	135
Gambar 8.15. Mekar dan menutupnya bunga tulip akibat perubahan suhu	135
Gambar 8.16. Menutupnya venus flytrap akibat kontak serangga	136

BAB 1

PENGANTAR FISILOGI TUMBUHAN

Oleh Oktaviani

1.1 Definisi Fisiologi Tumbuhan

Fisiologi tumbuhan adalah cabang ilmu biologi yang mempelajari fungsi dan proses yang terjadi di dalam tumbuhan, termasuk mekanisme yang mendukung kehidupan, pertumbuhan, dan reproduksi. Fisiologi tumbuhan mencakup berbagai proses seperti fotosintesis, respirasi, transportasi air dan nutrisi, serta regulasi hormon yang berkontribusi pada pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Secara sederhana, fisiologi tumbuhan menjelaskan "bagaimana tumbuhan hidup dan berfungsi", mulai dari tingkat molekuler hingga organisme secara keseluruhan. Studi ini berfokus pada aspek-aspek dinamis yang memungkinkan tumbuhan beradaptasi dengan lingkungan, menghasilkan energi, dan mempertahankan kelangsungan hidupnya.

1.1.1 Ruang Lingkup Studi dan Pentingnya Fisiologi Tumbuhan dalam Pertumbuhan

Fisiologi tumbuhan adalah cabang ilmu yang mempelajari berbagai proses biologis dan biokimia yang terjadi di dalam tumbuhan (Ningsih *et al.*, 2024). Ruang lingkupnya sangat luas, mencakup mekanisme-mekanisme penting yang mendukung kehidupan tumbuhan dan memungkinkan adaptasi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Salah satu proses fundamental dalam fisiologi tumbuhan adalah fotosintesis, yaitu proses yang memungkinkan tumbuhan mengubah energi matahari menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa. Proses ini tidak hanya menyediakan energi dan biomassa bagi tumbuhan itu sendiri tetapi juga menjadi dasar bagi rantai makanan di seluruh ekosistem. Fotosintesis melibatkan dua tahap utama, yaitu reaksi terang yang berlangsung di tilakoid dan menghasilkan ATP serta NADPH, serta

siklus Calvin yang terjadi di stroma dan menghasilkan gula. Efisiensi fotosintesis sangat memengaruhi pertumbuhan tumbuhan dan produksi biomassa yang diperlukan dalam pertanian dan ekosistem.

Selain fotosintesis, proses respirasi juga sangat penting dalam fisiologi tumbuhan. Respirasi adalah mekanisme metabolisme yang terjadi di mitokondria, di mana glukosa yang dihasilkan dari fotosintesis dipecah melalui serangkaian reaksi, seperti glikolisis, siklus krebs, dan rantai transport elektron, untuk menghasilkan ATP sebagai sumber energi utama (Firani, 2017). Energi ini digunakan untuk mendukung berbagai aktivitas seluler, seperti pembelahan, pemanjangan, dan diferensiasi sel. Respirasi juga memungkinkan tumbuhan untuk bertahan hidup dalam kondisi gelap atau ketika fotosintesis tidak dapat berlangsung, misalnya pada malam hari.

Selanjutnya, fisiologi tumbuhan juga mencakup transportasi air, nutrisi, dan senyawa organik di dalam tubuh tumbuhan. Transportasi air dimulai dari akar yang menyerap air melalui proses osmosis, kemudian bergerak ke atas melalui jaringan xilem dengan bantuan tekanan akar, kapilaritas, dan transpirasi. Sementara itu, hasil fotosintesis berupa gula diangkut oleh floem ke seluruh bagian tumbuhan untuk mendukung pertumbuhan dan metabolisme. Efisiensi transportasi ini sangat penting untuk memastikan semua jaringan tumbuhan mendapatkan suplai air, nutrisi mineral, dan energi yang cukup untuk mendukung aktivitasnya.

Regulasi proses-proses tersebut diatur oleh hormon tumbuhan, yang memainkan peran penting dalam pertumbuhan dan respon terhadap lingkungan. Hormon seperti auksin, giberelin, sitokinin, asam absisat, dan etilen bekerja secara sinergis atau antagonis untuk mengontrol proses seperti pemanjangan sel, pembentukan bunga dan buah, pematangan, serta adaptasi terhadap stres (Milawati, 2022). Sebagai contoh, auksin mendorong pemanjangan sel di batang, sementara asam absisat membantu tumbuhan bertahan dalam kondisi kekeringan dengan menutup stomata untuk mengurangi kehilangan air. Interaksi hormon-hormon ini menunjukkan kompleksitas regulasi fisiologi tumbuhan dalam menghadapi berbagai tantangan lingkungan.

Lebih jauh, fisiologi tumbuhan juga mempelajari adaptasi tumbuhan terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem, seperti kekeringan, suhu tinggi atau rendah, dan salinitas. Dalam menghadapi kekeringan, misalnya, tumbuhan dapat mengurangi transpirasi dengan menutup stomata atau mengakumulasi senyawa osmoprotektan seperti prolin untuk mempertahankan tekanan osmotik sel. Pada kondisi salinitas tinggi, tumbuhan mengatur pengangkutan ion-ion seperti natrium dan kalium untuk mencegah kerusakan sel. Adaptasi ini tidak hanya penting untuk kelangsungan hidup tumbuhan di alam liar, tetapi juga relevan dalam konteks pertanian, terutama di daerah yang sering mengalami perubahan iklim.

Pentingnya fisiologi tumbuhan terlihat jelas dalam berbagai aspek kehidupan manusia dan lingkungan. Dalam konteks produksi pangan, fisiologi tumbuhan membantu para ilmuwan dan petani memahami bagaimana meningkatkan hasil panen dengan cara mengoptimalkan fotosintesis, memperbaiki efisiensi penggunaan air, dan mengembangkan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap stres lingkungan. Misalnya, penelitian tentang mekanisme fotosintesis C4 pada tanaman seperti jagung telah memberikan wawasan untuk meningkatkan efisiensi tanaman C3 seperti padi. Selain itu, fisiologi tumbuhan juga penting dalam konservasi lingkungan, terutama dalam memahami peran tumbuhan dalam siklus karbon dan air. Melalui fotosintesis, tumbuhan menyerap karbon dioksida dari atmosfer, sehingga berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim. Transpirasi oleh tumbuhan juga memainkan peran penting dalam siklus air global, memengaruhi pola curah hujan dan ketersediaan air di suatu wilayah.

Fisiologi tumbuhan juga menjadi dasar bagi kemajuan bioteknologi, terutama dalam pengembangan tanaman unggul melalui manipulasi genetik. Pengetahuan tentang regulasi genetik, hormon, dan metabolisme telah memungkinkan para peneliti untuk menciptakan tanaman dengan sifat-sifat unggul, seperti tahan terhadap kekeringan, hama, atau penyakit. Contohnya adalah pengembangan tanaman tahan herbisida dan tanaman dengan hasil panen yang lebih tinggi menggunakan teknologi rekayasa genetika.

Secara keseluruhan, fisiologi tumbuhan memberikan pemahaman yang mendalam tentang bagaimana tumbuhan tumbuh, berkembang, dan beradaptasi. Pengetahuan ini tidak hanya penting untuk meningkatkan produksi pangan dan melestarikan lingkungan, tetapi juga membuka peluang baru dalam bioteknologi untuk menghadapi tantangan global, seperti perubahan iklim dan kebutuhan pangan yang terus meningkat. Dengan memahami fisiologi tumbuhan, kita dapat lebih menghargai peran penting tumbuhan dalam menjaga keseimbangan ekosistem.

1.1.2 Hubungan antara Fisiologi dan Ekologi

Fisiologi tumbuhan memiliki hubungan erat dengan ekologi, yaitu cabang biologi yang mempelajari hubungan organisme dengan lingkungannya. Menurut Rasidi dan Nurtiyani (2008) beberapa aspek hubungan ini meliputi:

1. Adaptasi terhadap lingkungan: Fisiologi tumbuhan menjelaskan bagaimana tumbuhan dapat beradaptasi dengan perubahan lingkungan, seperti kekeringan atau suhu ekstrem.
2. Interaksi dengan organisme lain: Misalnya, hubungan antara tumbuhan dan mikroorganisme dalam fiksasi nitrogen.
3. Kontribusi dalam ekosistem: Proses fisiologis seperti fotosintesis mendukung rantai makanan dan siklus nutrisi.
4. Melalui pemahaman fisiologi tumbuhan, kita dapat memahami bagaimana tumbuhan bertahan dan berkembang dalam kondisi lingkungan yang terus berubah.

1.2 Struktur dan Fungsi Sel Tumbuhan

1.2.1 Organisasi Sel Tumbuhan

Sel tumbuhan merupakan unit dasar kehidupan tumbuhan yang memiliki struktur khas untuk mendukung fungsinya dalam pertumbuhan, metabolisme, dan reproduksi (Agustina *et al.*, 2024). Struktur ini mencakup berbagai komponen yang saling bekerja sama, termasuk dinding sel, plastida, vakuola, membran plasma, sitoplasma, dan nukleus. Berikut adalah penjelasan lengkap mengenai masing-masing bagian tersebut (Agustina *et al.*, 2024):

1. Dinding Sel: Memberikan Bentuk dan Perlindungan

Dinding sel adalah lapisan keras di luar membran sel yang terbuat dari komponen utama seperti selulosa, hemiselulosa, dan pektin. Fungsi utama dinding sel adalah memberikan bentuk, kekuatan mekanis, dan perlindungan bagi sel tumbuhan. Selain itu, dinding sel memungkinkan sel tumbuhan untuk menahan tekanan turgor yang dihasilkan oleh air di dalam vakuola, menjaga struktur tumbuhan tetap tegak. Dinding sel juga memiliki pori-pori kecil, disebut plasmodesmata, yang memungkinkan komunikasi dan transportasi zat antar sel. Berbeda dengan sel hewan, dinding sel pada tumbuhan merupakan ciri khas yang membedakannya dan memberikan perlindungan tambahan terhadap lingkungan.

2. Plastida: Organela Vital untuk Fotosintesis

Plastida adalah organela yang hanya ditemukan pada sel tumbuhan dan beberapa protista. Salah satu jenis plastida yang paling penting adalah kloroplas, yang mengandung pigmen klorofil untuk menangkap energi cahaya selama fotosintesis. Kloroplas memiliki struktur khusus yang terdiri dari membran ganda dan tumpukan membran dalam disebut tilakoid, tempat berlangsungnya reaksi fotosintesis. Selain kloroplas, plastida lainnya seperti leukoplas berfungsi untuk menyimpan pati, protein, atau lipid, sementara kromoplas berperan dalam sintesis pigmen yang memberikan warna pada bunga dan buah. Plastida memainkan peran kunci dalam metabolisme tumbuhan dan sangat penting bagi keberlangsungan hidupnya.

3. Vakuola Besar: Penyimpanan dan Pengatur Tekanan Osmotik

Vakuola adalah struktur besar berbentuk kantong yang dikelilingi oleh membran semipermeabel bernama tonoplas. Vakuola pada sel tumbuhan berfungsi untuk menyimpan air, nutrisi, produk metabolik, dan zat-zat beracun. Fungsi lainnya adalah mengatur tekanan osmotik sel, yang penting untuk menjaga turgor sel dan bentuk tumbuhan. Dalam kondisi kekurangan air, vakuola kehilangan isinya, menyebabkan tekanan turgor menurun dan tumbuhan menjadi layu. Selain itu, vakuola juga berperan dalam pembuangan limbah seluler.

dan pengaturan pH intraseluler, membuatnya menjadi organela multifungsi dalam sel tumbuhan.

4. Membran Plasma: Pengatur Transportasi Zat

Membran plasma adalah lapisan selektif semipermeabel yang mengelilingi sitoplasma sel. Komponen utama membran ini adalah fosfolipid, protein, dan karbohidrat, yang bersama-sama membentuk struktur mosaik cair. Membran plasma mengontrol masuk dan keluarnya zat, seperti air, ion, nutrisi, dan produk metabolisme, melalui mekanisme transportasi aktif maupun pasif. Selain itu, membran plasma juga berperan dalam menerima sinyal dari lingkungan luar melalui protein reseptor. Fungsinya yang penting sebagai pengatur pertukaran zat membuat membran plasma menjadi pusat komunikasi antara sel dengan lingkungannya.

5. Sitoplasma: Media Tempat Organel Terletak

Sitoplasma adalah cairan koloid yang mengisi ruang dalam sel dan menjadi tempat berbagai organela, seperti mitokondria, kloroplas, dan retikulum endoplasma, berlokasi. Sitoplasma mengandung air, ion, enzim, protein, dan molekul organik yang mendukung berbagai reaksi kimia yang terjadi di dalam sel. Sitoplasma juga memiliki kerangka internal berupa sitoskeleton, yang memberikan dukungan struktural dan memungkinkan pergerakan organela di dalam sel. Peran sitoplasma sangat penting untuk memastikan koordinasi dan efisiensi aktivitas metabolik di dalam sel tumbuhan.

6. Nukleus: Pusat Kontrol dan Penyimpan Informasi Genetik

Nukleus adalah organela yang berfungsi sebagai pusat kontrol aktivitas sel. Nukleus dikelilingi oleh membran inti ganda yang dilengkapi dengan pori-pori nuklir untuk pertukaran molekul antara nukleus dan sitoplasma. Di dalam nukleus terdapat kromatin, yaitu materi genetik berupa DNA yang terorganisasi bersama protein histon. DNA menyimpan informasi genetik yang mengatur sintesis protein melalui proses transkripsi dan translasi. Selain itu, nukleus juga mengandung nukleolus, yang berperan dalam sintesis ribosom. Fungsi nukleus dalam mengontrol aktivitas sel dan menyimpan

informasi genetik menjadikannya organela yang sangat penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Struktur khas sel tumbuhan ini, dengan dinding sel yang kokoh, plastida untuk fotosintesis, vakuola besar sebagai penyimpanan, serta nukleus sebagai pusat kontrol, memungkinkan tumbuhan untuk menjalankan fungsi biologisnya secara optimal. Kombinasi dari semua komponen ini menciptakan sistem yang terintegrasi dan efisien untuk mendukung kehidupan tumbuhan di berbagai kondisi lingkungan.

Struktur ini bekerja sama untuk mendukung fungsi metabolisme, pertumbuhan, dan perkembangan tumbuhan.

1.2.2 Plastida dan Perannya dalam Metabolisme

Plastida adalah organela yang khas pada sel tumbuhan dan berperan penting dalam metabolisme. Ada beberapa jenis plastida dengan fungsi spesifik (Agustina *et al.*, 2024):

1. Kloroplas: Berperan dalam Fotosintesis, Menghasilkan Energi Kimia dalam Bentuk Glukosa

Kloroplas adalah organel yang berfungsi sebagai pusat fotosintesis pada tumbuhan dan alga. Organel ini berbentuk lensa bikonveks dengan membran ganda yang membungkusnya, yaitu membran luar dan membran dalam. Struktur internal kloroplas mencakup tilakoid, yang tersusun dalam tumpukan disebut grana, dan dikelilingi oleh cairan matriks bernama stroma. Pigmen hijau klorofil, yang terdapat dalam membran tilakoid, memainkan peran penting dalam menangkap energi cahaya matahari. Dalam proses fotosintesis, kloroplas mengubah energi cahaya menjadi energi kimia melalui dua tahap utama: reaksi terang dan reaksi gelap (siklus Calvin). Reaksi terang terjadi di membran tilakoid, di mana cahaya diubah menjadi energi kimia dalam bentuk ATP dan NADPH. Selanjutnya, pada reaksi gelap yang berlangsung di stroma, karbon dioksida (CO_2) diubah menjadi glukosa melalui serangkaian reaksi enzimatik. Kloroplas tidak hanya penting untuk menghasilkan energi bagi tumbuhan, tetapi juga menjadi

sumber energi bagi makhluk lain yang bergantung pada tumbuhan sebagai produsen dalam rantai makanan.

2. Amiloplas: Menyimpan Pati sebagai Cadangan Makanan

Amiloplas adalah plastida tidak berwarna (leukoplas) yang berfungsi untuk menyimpan pati sebagai cadangan makanan bagi tumbuhan. Organel ini banyak ditemukan pada jaringan penyimpanan, seperti di umbi (kentang), biji, dan akar. Amiloplas memiliki kemampuan untuk mensintesis pati dari glukosa melalui polimerisasi molekul-molekul glukosa menjadi amilosa dan amilopektin. Selama masa pertumbuhan atau kebutuhan energi, pati yang disimpan dalam amiloplas dapat dihidrolisis menjadi glukosa melalui proses enzimatik, kemudian digunakan dalam respirasi seluler untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP. Fungsi amiloplas sangat penting dalam mendukung kelangsungan hidup tumbuhan, terutama pada kondisi lingkungan yang tidak mendukung fotosintesis, seperti di malam hari atau saat musim tidak menguntungkan. Selain itu, keberadaan amiloplas juga berkontribusi dalam cadangan makanan bagi organisme lain, seperti manusia dan hewan, yang mengonsumsi bagian tumbuhan yang kaya akan pati.

3. Kromoplas: Memberi Warna pada Bunga dan Buah untuk Menarik Penyerbuk

Kromoplas adalah plastida yang mengandung pigmen non-fotosintetik, seperti karotenoid (kuning, oranye, merah) dan xantofil, yang bertanggung jawab untuk memberi warna cerah pada bunga, buah, dan bagian tumbuhan lainnya. Pigmen ini bukan hanya berfungsi estetis, tetapi memiliki peran ekologi yang penting, terutama dalam menarik penyerbuk seperti serangga, burung, dan hewan lain untuk membantu proses penyerbukan dan penyebaran biji. Kromoplas sering terbentuk dari kloroplas yang mengalami diferensiasi ketika buah matang atau daun berubah warna saat musim gugur. Sebagai contoh, perubahan warna dari hijau menjadi merah atau oranye pada tomat dan cabai disebabkan oleh akumulasi pigmen karotenoid dalam kromoplas. Selain peran ekologisnya, pigmen yang dihasilkan kromoplas juga memiliki manfaat tambahan, seperti

melindungi sel tumbuhan dari kerusakan oksidatif akibat radiasi cahaya tinggi. Bagi manusia, pigmen-pigmen ini berkontribusi sebagai sumber nutrisi dan antioksidan alami dalam makanan.

Ketiga organel ini kloroplas, amiloplas, dan kromoplas menunjukkan bagaimana plastida dalam tumbuhan memiliki peran yang beragam, mulai dari fotosintesis hingga penyimpanan dan pewarnaan, yang semuanya mendukung kehidupan tumbuhan serta ekosistem secara keseluruhan.

Peran plastida sangat penting karena memfasilitasi produksi energi dan penyimpanan senyawa organik yang diperlukan untuk pertumbuhan.

1.2.3 Peran Dinding Sel dalam Pertumbuhan

Dinding sel memberikan kekuatan struktural, fleksibilitas, dan perlindungan terhadap tekanan osmotik. Dalam konteks pertumbuhan (Agustina *et al.*, 2024):

1. Elongasi sel: Dinding sel memungkinkan peregangan saat sel tumbuh.
2. Komunikasi antar sel: Plasmodesmata (saluran di dinding sel) memungkinkan pertukaran sinyal dan nutrisi.
3. Perlindungan: Melindungi sel dari patogen dan tekanan mekanis.

Komposisi dinding sel, yang terdiri dari selulosa, hemiselulosa, dan lignin, menentukan kekakuan dan kemampuan tumbuhan untuk berdiri tegak.

1.3 Regulasi Pertumbuhan oleh Hormon Tumbuhan

Berikut adalah penjelasan mendalam mengenai jenis-jenis hormon tumbuhan dan peran masing-masing hormon (Wardani *et al.*, 2023):

1. Auksin

Auksin adalah hormon tumbuhan utama yang berperan dalam pengaturan pertumbuhan dan perkembangan tanaman, terutama dalam proses pemanjangan sel. Hormon ini pertama

kali ditemukan melalui percobaan pada koleoptil rumput oleh Charles Darwin dan kemudian dikembangkan melalui penelitian lebih lanjut oleh para ilmuwan.

a. Mengatur elongasi sel di daerah meristem:

Auksin diproduksi di bagian ujung tumbuhan, seperti pucuk batang dan akar (daerah meristem apikal). Mekanisme kerjanya dijelaskan melalui hipotesis asam, yaitu auksin merangsang pompa proton (H^+ ATPase) pada membran plasma untuk mengeluarkan ion H^+ ke dinding sel. Hal ini menurunkan pH dinding sel dan mengaktifkan enzim ekspansin yang melemahkan ikatan antara mikrofibril selulosa, sehingga memungkinkan dinding sel untuk meregang. Proses ini memicu pemanjangan sel di daerah meristem, yang penting dalam pertumbuhan batang dan akar.

b. Berperan dalam fototropisme dan gravitropisme:

Auksin mengatur pertumbuhan diferensial dalam respons terhadap cahaya (fototropisme) dan gravitasi (gravitropisme). Pada fototropisme, auksin berpindah ke sisi sel yang tidak terkena cahaya, menyebabkan sel di sisi tersebut memanjang lebih cepat dan membuat batang melengkung ke arah sumber cahaya. Sementara itu, dalam gravitropisme, distribusi auksin berpengaruh pada pertumbuhan akar dan batang; auksin terakumulasi di bagian bawah batang, memicu pemanjangan sel yang menyebabkan batang tumbuh ke atas. Sebaliknya, pada akar, konsentrasi auksin tinggi justru menghambat pertumbuhan, sehingga akar tumbuh ke bawah mengikuti gravitasi.

2. Sitokinin

Sitokinin adalah hormon tumbuhan yang berperan penting dalam proses pembelahan sel dan pembentukan organ. Sitokinin bekerja secara sinergis dengan auksin untuk mengatur berbagai aktivitas pertumbuhan, terutama dalam proses sitokinesis (pembagian sitoplasma).

- a. Merangsang pembelahan sel (sitokinesis):
Sitokinin diproduksi di daerah akar, buah, dan biji yang sedang berkembang. Hormon ini merangsang pembelahan sel melalui aktivasi siklus sel pada fase G2 ke M. Sitokinin berperan dalam mempercepat laju pembentukan jaringan baru, sehingga penting dalam regenerasi dan perkembangan organ-organ tanaman.
- b. Berperan dalam pembentukan organ seperti daun dan akar:
Sitokinin bersama auksin menentukan arah perkembangan jaringan meristem. Rasio sitokinin dan auksin sangat menentukan jenis organ yang akan terbentuk:
 - 1) Sitokinin tinggi, auksin rendah: Mendorong pembentukan tunas atau daun.
 - 2) Sitokinin rendah, auksin tinggi: Merangsang pembentukan akar.

Selain itu, sitokinin juga menunda senescence (penuaan) dengan menghambat degradasi klorofil dan protein di daun, sehingga daun tetap hijau lebih lama.

3. Giberelin

Giberelin adalah kelompok hormon yang memengaruhi berbagai aspek pertumbuhan tanaman, seperti pemanjangan batang, perkecambahan, dan pemecahan dormansi. Hormon ini pertama kali ditemukan pada jamur *Gibberella fujikuroi* yang menyebabkan penyakit "etiulasi" pada tanaman padi.

- a. Memicu pertumbuhan batang dan elongasi internodus:
Giberelin memacu pemanjangan sel dengan meningkatkan ekspresi gen yang berperan dalam sintesis enzim pengendur dinding sel. Hormon ini sangat penting pada tumbuhan kerdil (dwarf), di mana pemberian giberelin dapat mengembalikan ukuran normal tanaman. Giberelin juga memicu elongasi internodus, sehingga batang tumbuh memanjang secara signifikan.
- b. Merangsang perkecambahan biji dan pemecahan dormansi:

Giberelin berperan dalam mengakhiri dormansi biji dengan memicu sintesis enzim amilase di aleuron. Amilase memecah pati menjadi gula sederhana yang digunakan sebagai sumber energi selama perkecambahan. Proses ini juga melibatkan interaksi dengan hormon asam absisat (ABA), di mana giberelin bertindak sebagai "pemicu" pertumbuhan sedangkan ABA bertindak sebagai "penghambat" dormansi.

4. Asam Absisat (ABA)

Asam absisat (ABA) sering disebut sebagai "hormon stres" karena berperan dalam adaptasi tumbuhan terhadap kondisi lingkungan yang tidak mendukung, seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan salinitas.

- a. Menghambat pertumbuhan dalam kondisi stres, seperti kekeringan:

ABA diproduksi dalam jumlah tinggi ketika tumbuhan mengalami stres kekeringan. Hormon ini bekerja dengan menghambat aktivitas meristem apikal, sehingga pertumbuhan tanaman melambat untuk mengurangi penggunaan energi dan air.

- b. Mengatur penutupan stomata untuk mengurangi kehilangan air:

Dalam kondisi kekeringan, ABA menginduksi penutupan stomata dengan merangsang keluar ion K^+ dari sel penjaga. Hal ini menyebabkan penurunan tekanan turgor di sel penjaga, sehingga stomata menutup dan mengurangi transpirasi. Mekanisme ini membantu tumbuhan mempertahankan keseimbangan air selama periode kekeringan.

5. Etilen

Etilen adalah satu-satunya hormon tumbuhan dalam bentuk gas. Hormon ini berperan penting dalam pematangan buah, penuaan, serta respons tumbuhan terhadap stres lingkungan.

- a. Mengatur pematangan buah dan respon terhadap stres:
Etilen mempercepat proses pematangan buah dengan merangsang degradasi klorofil, pelunakan dinding sel, serta peningkatan sintesis gula dan aroma. Hormon ini bekerja secara positif dalam sistem umpan balik, di mana pematangan buah merangsang produksi lebih banyak etilen. Selain itu, etilen juga diproduksi dalam jumlah tinggi sebagai respons terhadap stres mekanis (misalnya, luka) atau serangan patogen.
- b. Memengaruhi pembentukan akar adventif:
Etilen bekerja sama dengan auksin untuk memicu pertumbuhan akar adventif, yaitu akar yang tumbuh dari bagian batang atau daun. Fenomena ini sangat penting dalam perbanyakan vegetatif tumbuhan, seperti stek batang.
Selain itu, etilen berperan dalam fenomena triple response pada tanaman muda, yang melibatkan penghambatan pemanjangan batang, peningkatan penebalan batang, dan perubahan pola pertumbuhan agar dapat menghindari hambatan mekanis.

1.3.1 Mekanisme Kerja Hormon pada Tingkat Molekuler dan Seluler

Hormon tumbuhan bekerja melalui mekanisme kompleks, dimulai dari reseptor spesifik yang mengenali hormon, kemudian memicu rangkaian transduksi sinyal. Menurut Hidayat (2020) mekanisme ini melibatkan:

1. Reseptor hormon: Protein khusus yang mengenali molekul hormon.
2. Sinyal kedua: Molekul seperti ion kalsium atau protein kinase yang memperkuat sinyal.
3. Ekspresi gen: Hormon dapat mengaktifkan atau menonaktifkan gen yang mengatur pertumbuhan.

Misalnya, auksin memengaruhi elongasi sel dengan meningkatkan keasaman di dinding sel, sehingga dinding lebih lentur untuk memperpanjang ukuran sel.

1.3.2 Interaksi Antar Hormon dalam Mengatur Pertumbuhan

Hormon tumbuhan tidak bekerja secara terisolasi, tetapi saling berinteraksi untuk mengatur berbagai proses fisiologis (Arumingtyas *et al.*, 2021):

1. Sinergi: Auksin dan sitokinin bekerja sama dalam pembentukan jaringan baru.
2. Antagonisme: ABA menghambat efek giberelin dalam perkecambahan biji.
3. Kombinasi: Etilen dan auksin berinteraksi dalam pembentukan akar dan respon terhadap stres.

1.4 Proses Fotosintesis dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan

Fotosintesis adalah proses biokimia di mana tumbuhan hijau mengonversi energi cahaya menjadi energi kimia dalam bentuk glukosa. Menurut Song (2012) ada tiga jalur utama fotosintesis:

1. Fotosintesis C₃
 - a. Jalur paling umum digunakan oleh tumbuhan, disebut jalur C₃ karena senyawa pertama yang terbentuk adalah 3-fosfoglisarat (senyawa dengan 3 atom karbon).
 - b. Proses ini berlangsung di mesofil daun dan melibatkan enzim Rubisco yang mengikat CO₂ dalam siklus Calvin.
 - c. Tumbuhan C₃ cenderung kurang efisien dalam kondisi panas dan kering karena fotorespirasi meningkat. Contohnya: padi, gandum, dan kacang-kacangan.
2. Fotosintesis C₄
 - a. Tumbuhan C₄ memiliki mekanisme untuk meminimalkan fotorespirasi dengan memisahkan fiksasi karbon dan siklus Calvin di ruang yang berbeda.
 - b. CO₂ diikat oleh enzim PEP karboksilase di sel mesofil, membentuk senyawa 4 karbon (oksaloasetat), yang kemudian dipindahkan ke sel-sel bundel sarung tempat siklus Calvin berlangsung.
 - c. Jalur ini lebih efisien dalam kondisi panas dan kering. Contohnya: jagung, sorgum, dan tebu.

3. Fotosintesis CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*)
 - a. Tumbuhan CAM menyerap CO_2 pada malam hari dan menyimpannya dalam bentuk asam organik, yang kemudian digunakan untuk fotosintesis pada siang hari.
 - b. Strategi ini memungkinkan tumbuhan mengurangi kehilangan air dalam kondisi ekstrem, seperti di gurun. Contohnya: kaktus dan nanas.

1.4.1 Pengaruh Hasil Fotosintesis pada Pertumbuhan dan Perkembangan

Hasil fotosintesis, berupa glukosa, berperan penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan (Fauziah, 2021):

1. Sumber energi: Glukosa digunakan dalam respirasi untuk menghasilkan ATP, energi utama untuk semua proses fisiologi.
2. Bahan penyusun: Glukosa menjadi bahan dasar sintesis senyawa kompleks seperti selulosa (untuk dinding sel) dan pati (cadangan energi).
3. Metabolisme sekunder: Glukosa mendukung pembentukan metabolit sekunder seperti alkaloid dan flavonoid, yang membantu tumbuhan bertahan dari stres biotik dan abiotik.

Pertumbuhan yang optimal membutuhkan fotosintesis yang efisien untuk menyediakan energi dan bahan baku dalam pembelahan, diferensiasi, dan perpanjangan sel.

Menurut Fauziah (2021) faktor lingkungan yang memengaruhi efisiensi fotosintesis antara lain:

1. Cahaya: Intensitas, kualitas (panjang gelombang), dan durasi cahaya memengaruhi laju fotosintesis.
2. Karbon dioksida (CO_2): Ketersediaan CO_2 sangat penting untuk fiksasi karbon dalam siklus Calvin.
3. Suhu: Enzim fotosintesis bekerja optimal pada suhu tertentu; suhu terlalu tinggi meningkatkan fotorespirasi.
4. Ketersediaan air: Kekurangan air menyebabkan stomata menutup, menghambat difusi CO_2 .
5. Nutrisi: Unsur hara seperti nitrogen, magnesium, dan fosfor diperlukan untuk pembentukan klorofil dan ATP.

1.5 Respirasi dan Produksi Energi

1.5.1 Jalur Metabolisme Respirasi

Respirasi seluler adalah proses metabolisme di mana molekul glukosa ($C_6H_{12}O_6$) dipecah melalui serangkaian reaksi biokimia untuk menghasilkan energi dalam bentuk ATP (adenosin trifosfat) (Irawan, 2007). Proses ini merupakan katabolisme aerobik, yang membutuhkan oksigen sebagai akseptor elektron terakhir. Energi yang dihasilkan sangat penting bagi sel untuk menjalankan berbagai aktivitas metabolisme, seperti sintesis protein, pembelahan sel, dan transpor aktif. Respirasi seluler terjadi dalam tiga tahap utama, yaitu glikolisis, siklus Krebs, dan rantai transport elektron (ETC) (Rahmi *et al.*, 2023).

1. Glikolisis

Glikolisis terjadi di sitoplasma sel, baik pada organisme prokariotik maupun eukariotik. Glikolisis adalah tahap pertama dari respirasi seluler, di mana satu molekul glukosa ($C_6H_{12}O_6$) dipecah menjadi dua molekul asam piruvat ($C_3H_4O_3$). Proses ini tidak memerlukan oksigen (anaerobik) dan terdiri dari 10 reaksi enzimatik yang dapat dibagi menjadi dua fase:

- a. Fase Investasi Energi: Sel menggunakan 2 ATP untuk mengaktifkan molekul glukosa sehingga glukosa dapat dipecah.
- b. Fase Pembangkitan Energi: Dua molekul asam piruvat terbentuk, dan energi yang dilepaskan digunakan untuk membentuk 4 ATP dan 2 NADH.

Hasil Glikolisis yaitu 2 ATP (netto), 2 NADH (pembawa elektron berenergi tinggi), dan 2 molekul asam piruvat. Asam piruvat yang dihasilkan akan memasuki mitokondria untuk tahap selanjutnya jika oksigen tersedia. Jika tidak ada oksigen, asam piruvat akan mengalami fermentasi.

2. Siklus Krebs (Siklus Asam Sitrat)

Siklus Krebs terjadi di matriks mitokondria, yaitu bagian dalam mitokondria yang kaya akan enzim metabolik. Sebelum memasuki siklus Krebs, asam piruvat dari glikolisis diubah menjadi asetil-KoA melalui proses dekarboksilasi oksidatif. Reaksi ini melepaskan satu molekul CO_2 dan menghasilkan satu NADH. Asetil-KoA (C_2) kemudian bergabung dengan

oksaloasetat (C_4) untuk membentuk sitrat (C_6), yang kemudian mengalami serangkaian reaksi oksidasi dan dekarboksilasi. Proses ini menghasilkan molekul energi dan mengembalikan oksaloasetat sehingga siklus dapat berulang. Karena satu molekul glukosa menghasilkan dua molekul asetil-KoA, siklus ini berputar dua kali untuk setiap molekul glukosa. Hasil akhirnya adalah 2 ATP, 6 NADH (pembawa elektron berenergi tinggi), 2 $FADH_2$ (pembawa elektron), dan 4 CO_2 (produk sisa yang dibuang melalui pernapasan). Siklus Krebs sangat penting karena menghasilkan NADH dan $FADH_2$, yang berperan sebagai donor elektron dalam rantai transport elektron.

3. Rantai Transport Elektron (*Electron Transport Chain* / ETC)

Rantai transport elektron terjadi di membran dalam mitokondria, yang memiliki struktur berlipat-lipat (krista) untuk memperluas permukaan tempat reaksi terjadi. ETC adalah tahap terakhir respirasi seluler, di mana NADH dan $FADH_2$ yang dihasilkan dari tahap sebelumnya menyumbangkan elektron ke kompleks protein di membran mitokondria. Proses ini melibatkan langkah-langkah berikut:

- Elektron dari NADH dan $FADH_2$ diangkut melalui serangkaian kompleks protein (Kompleks I, II, III, dan IV) yang berfungsi sebagai akseptor dan donor elektron.
- Pergerakan elektron ini memicu pemompaan ion H^+ (proton) dari matriks ke ruang antar membran, menciptakan gradien proton.
- Gradien proton ini menciptakan energi potensial yang dikenal sebagai gaya gerak proton (proton motive force).
- Proton kembali ke matriks melalui enzim ATP sintase, yang memanfaatkan energi dari aliran proton untuk menggabungkan ADP dan P_i menjadi ATP (fosforilasi oksidatif).
- Akhirnya, elektron bertemu dengan oksigen (akseptor elektron terakhir) dan membentuk molekul air (H_2O).

Hasil rantai transport elektron adalah sekitar 32-34 ATP dihasilkan dalam tahap ini dari satu molekul glukosa,

menjadikannya sumber utama produksi energi dalam respirasi seluler. Total energi yang dihasilkan adalah jumlah ATP yang dihasilkan dalam respirasi seluler dari satu molekul glukosa adalah sekitar 36-38 ATP. Perinciannya yaitu glikolisis: 2 ATP (netto), siklus krebs 2 ATP, dan rantai transport elektron 32-34 ATP. Namun, jumlah total ATP dapat bervariasi tergantung pada efisiensi sistem transpor elektron dan kondisi seluler lainnya. Dalam kondisi normal, produksi ATP berkisar di angka 36-38 molekul ATP.

1.5.2 Hubungan antara Respirasi dan Pertumbuhan Sel

Respirasi seluler berperan penting dalam menyediakan energi dalam bentuk ATP yang digunakan untuk menunjang berbagai aktivitas fisiologis sel (Pattipeilohy, 2024). Tanpa energi dari proses respirasi, pertumbuhan sel tidak dapat terjadi secara optimal karena energi diperlukan untuk mendukung pembelahan sel, sintesis senyawa, dan transport aktif. Berikut penjelasan lebih rinci mengenai hubungan antara respirasi dan pertumbuhan sel (Pattipeilohy, 2024):

1. Pembelahan Sel

Pembelahan sel melibatkan serangkaian tahap kompleks seperti replikasi DNA, pemisahan kromosom, dan pembentukan dua sel anak identik. Semua proses ini memerlukan energi yang besar dalam bentuk ATP. Setelah sel membelah, sel anak memerlukan organel baru (seperti mitokondria, kloroplas, dan ribosom) untuk mendukung fungsi seluler. Proses sintesis dan perakitan organel ini juga memerlukan energi dari respirasi. Setelah pembelahan, sel mengalami pemanjangan melalui aktivitas dinding sel. Proses ini melibatkan pergerakan ion, air, dan sintesis komponen dinding sel yang membutuhkan energi. Contoh: pertumbuhan aktif pada jaringan meristem apikal (ujung batang atau akar) membutuhkan energi dari respirasi untuk mendukung pembelahan sel yang cepat.

2. Sintesis Senyawa

ATP digunakan untuk menggabungkan asam amino menjadi rantai polipeptida selama translasi di ribosom. Protein ini sangat penting dalam membentuk enzim, hormon, dan

struktur seluler seperti dinding sel dan membran plasma. Lipid, seperti fosfolipid, dibutuhkan untuk membangun membran sel dan organel. Proses sintesis lipid memerlukan energi untuk menggabungkan prekursor lipid menjadi struktur yang lebih kompleks. Tumbuhan menyimpan energi dalam bentuk pati dan membentuk selulosa untuk dinding sel. Proses polimerisasi glukosa menjadi struktur kompleks ini bergantung pada energi yang dihasilkan melalui respirasi. Jika tidak adanya energi yang cukup dari respirasi, sintesis komponen penting seperti protein, lipid, dan polisakarida akan terhambat, sehingga sel tidak dapat tumbuh dan berfungsi dengan baik.

3. Transpor Aktif

Transpor aktif adalah proses perpindahan ion atau molekul melawan gradien konsentrasi dengan bantuan energi dari ATP. Proses ini sangat penting dalam menjaga keseimbangan ion di dalam dan luar sel. Pompa proton (H^+) di membran sel dan vakuola memerlukan ATP untuk mengatur pH sel dan memfasilitasi transport nutrisi. Pada akar tumbuhan, energi dari respirasi mendukung penyerapan ion mineral seperti nitrogen, fosfor, dan kalium dari tanah melalui transpor aktif. ATP memungkinkan transport zat-zat penting ke bagian tumbuhan yang membutuhkannya, seperti tunas muda, daun, atau organ penyimpanan. Dengan tidak adanya energi dari respirasi, sel-sel akar tidak dapat menyerap unsur hara esensial dengan efektif, yang akan menghambat pertumbuhan tumbuhan secara keseluruhan.

1.6 Transportasi Nutrisi dan Air dalam Tumbuhan

Transportasi air dan nutrisi dalam tumbuhan merupakan proses vital yang memastikan tumbuhan mendapatkan sumber daya yang dibutuhkan untuk pertumbuhan, fotosintesis, dan perkembangan (Susilo *et al.*, 2024). Air dan nutrisi diserap oleh akar dari tanah dan diangkut ke berbagai bagian tumbuhan melalui sistem vaskular, yaitu xilem dan floem. Mekanisme ini sangat penting untuk mempertahankan homeostasis, mendorong elongasi sel, dan mendukung proses metabolisme.

1.6.1 Mekanisme Transportasi Air

Air merupakan komponen utama dalam tubuh tumbuhan yang terlibat dalam berbagai proses fisiologis. Transportasi air berlangsung dari akar menuju daun melalui xilem. Proses ini terjadi melalui tiga mekanisme utama (Susilo *et al.*, 2024):

1. Osmosis

Osmosis adalah pergerakan air dari larutan dengan konsentrasi zat terlarut rendah (hipotonik) ke larutan dengan konsentrasi zat terlarut tinggi (hipertonik) melalui membran semipermeabel. Pada akar tumbuhan, air dari tanah masuk ke dalam sel-sel akar melalui osmosis karena potensi air di dalam sel akar lebih rendah dibandingkan potensi air di tanah. Proses ini memastikan penyerapan air secara kontinu untuk mendukung proses transpor menuju bagian atas tumbuhan.

2. Transpirasi

Transpirasi adalah proses kehilangan air dalam bentuk uap melalui stomata di permukaan daun. Proses ini menciptakan tekanan negatif (tegangan transpirasi) yang menarik air dari akar ke daun melalui xilem. Kohesi dan adhesi memainkan peran penting dalam mekanisme ini. Molekul air saling tarik menarik (kohesi) dan menempel pada dinding pembuluh xilem (adhesi), sehingga membentuk kolom air yang tidak mudah terputus. Transpirasi juga berfungsi untuk mendinginkan daun dan memfasilitasi transportasi nutrisi ke daun.

3. Tekanan Akar

Tekanan akar adalah tekanan positif yang dihasilkan oleh sel-sel akar saat menyerap ion dan air dari tanah. Ion-ion diserap secara aktif, menyebabkan potensial osmotik dalam sel-sel akar menurun dan mendorong air masuk. Tekanan akar membantu mendorong air naik melalui xilem, terutama pada malam hari saat transpirasi rendah. Fenomena seperti gutasi (keluarnya tetesan air di tepi daun) menunjukkan peran tekanan akar dalam mendorong air ke seluruh bagian tumbuhan.

Mekanisme transportasi air ini memastikan bahwa suplai air mencukupi untuk mendukung fotosintesis,

pertumbuhan sel, dan pendinginan tumbuhan melalui penguapan.

1.6.2 Penyerapan dan Distribusi Unsur Hara Esensial

Nutrisi esensial seperti nitrogen (N), fosfor (P), kalium (K), magnesium (Mg), dan unsur mikro lainnya sangat penting bagi pertumbuhan tumbuhan. Penyerapan dan distribusi nutrisi berlangsung sebagai berikut (Damanhuri *et al.*, 2022):

1. Penyerapan Nutrisi

Nutrisi diserap oleh akar dalam bentuk ion-ion anorganik dari larutan tanah melalui mekanisme transpor aktif dengan bantuan protein transpor di membran sel akar. Mikoriza (jamur simbiotik) meningkatkan kemampuan akar dalam menyerap air dan nutrisi, terutama fosfor, dengan memperluas permukaan penyerapan. Nutrisi seperti nitrogen diserap dalam bentuk nitrate (NO_3^-) atau ammonium (NH_4^+), sedangkan kalium dan fosfor diserap dalam bentuk ion K^+ dan H_2PO_4^- .

2. Distribusi Nutrisi

Setelah diserap, nutrisi ditransportasikan melalui xilem bersama aliran air menuju daun dan organ lain. Nutrisi juga dapat didistribusikan melalui floem dalam bentuk getah floem. Ini terjadi ketika fotosintat (hasil fotosintesis) bergerak dari daun ke bagian tumbuhan yang membutuhkan melalui proses translokasi. Nutrisi yang didistribusikan mendukung berbagai proses penting seperti: sintesis klorofil (magnesium), pembelahan sel (fosfor), dan keseimbangan osmotik (kalium).

1.6.3 Hubungan Transportasi Nutrisi dengan Mekanisme Pertumbuhan

Air dan nutrisi yang diangkut ke seluruh bagian tumbuhan memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan melalui berbagai mekanisme (Avivi, 2021):

1. Elongasi Sel

- a. Air yang masuk ke dalam vakuola sel menghasilkan tekanan turgor, yang mendorong dinding sel untuk meregang.
- b. Nutrisi seperti kalium membantu menjaga keseimbangan osmotik di dalam sel, yang memungkinkan proses pemanjangan sel terjadi secara optimal.

2. Diferensiasi Jaringan

- a. Nutrisi esensial seperti fosfor dan nitrogen mendukung sintesis asam nukleat dan protein, yang penting dalam proses pembelahan dan diferensiasi sel menjadi jaringan khusus.
- b. Misalnya, pembentukan jaringan xilem dan floem membutuhkan nutrisi seperti kalsium dan boron.

3. Pembentukan Organ

- a. Pertumbuhan akar, batang, daun, dan bunga bergantung pada ketersediaan nutrisi dan air.
- b. Fosfor sangat penting untuk pertumbuhan akar, sedangkan nitrogen mendukung perkembangan daun yang sehat dan hijau.

Dampak Ketidakseimbangan Transportasi Nutrisi

- a. Kekurangan nutrisi menyebabkan gangguan fisiologis seperti:
 - 1) Klorosis: Kekurangan nitrogen menyebabkan daun menguning karena sintesis klorofil terganggu.
 - 2) Nekrosis: Kekurangan kalium menyebabkan tepi daun mati dan jaringan menjadi rusak.
- b. Ketidakseimbangan ini akan menghambat pertumbuhan sel, mengurangi aktivitas fotosintesis, dan akhirnya memengaruhi produktivitas tumbuhan secara keseluruhan.

1.7 Regulasi Genetik dalam Pertumbuhan Tumbuhan

17.1 Ekspresi Gen yang Mengatur Pertumbuhan dan Diferensiasi

Pertumbuhan dan diferensiasi tumbuhan dikendalikan oleh ekspresi gen tertentu yang bekerja secara hierarkis dan terkoordinasi (Sinaga, 2010):

1. Gen homeotik:
 - a. Mengatur pembentukan pola dan struktur organ.
 - b. Contoh: Gen MADS-box, yang berperan dalam pengaturan pembentukan bunga (seperti kelopak, benang sari, dan putik).
2. Gen pengatur siklus sel:
 - a. Mengontrol pembelahan sel melalui regulasi tahap mitosis dan sitokinesis.
 - b. Contoh: Gen CDK (*Cyclin-Dependent Kinase*) yang bekerja dalam pembelahan sel.
3. Gen pengatur hormon:
 - a. Mengatur sintesis dan distribusi hormon tumbuhan seperti auksin, giberelin, dan sitokinin.
 - b. Contoh: Gen YUCCA yang terlibat dalam biosintesis auksin.
4. Gen transkripsi spesifik:
 - a. Mengontrol diferensiasi sel dan jaringan.
 - b. Contoh: Gen WOX (*WUSCHEL-related Homeobox*) yang berperan dalam pembentukan meristem.

Proses ini dimulai dari sinyal lingkungan atau internal yang diterjemahkan oleh reseptor, diikuti aktivasi atau penonaktifan gen, sehingga tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang sesuai kebutuhan.

1.7.2 Pengaruh Faktor Lingkungan terhadap Regulasi Genetik

Lingkungan memengaruhi ekspresi gen tumbuhan melalui mekanisme regulasi yang fleksibel, memungkinkan adaptasi dalam berbagai kondisi (Arumingtyas *et al.*, 2022):

1. Cahaya:

- a. Memengaruhi ekspresi gen fotomorfogenesis, seperti gen PHY (*Phytochrome*) yang mengatur pertumbuhan tanaman terhadap cahaya.
- b. Contoh: Cahaya merah meningkatkan elongasi batang, sementara cahaya biru merangsang pembentukan daun.

2. Suhu:

- a. Suhu rendah dapat mengaktifkan gen-gen yang terkait dengan toleransi dingin, seperti gen CBF (*C-repeat Binding Factor*).
- b. Suhu tinggi dapat mengaktifkan protein kejut panas (Heat Shock Proteins, HSP) yang melindungi protein lain dari kerusakan.
- c. Suhu memengaruhi aktivitas enzimatik dalam tumbuhan, yang berdampak langsung pada laju metabolisme dan pertumbuhan:

Suhu optimal adalah suhu di mana aktivitas enzim tumbuhan mencapai puncaknya. Pada suhu ekstrem (terlalu rendah atau tinggi), enzim menjadi tidak aktif atau terdenaturasi.

3. Vernalization:

- a. Beberapa tumbuhan memerlukan suhu dingin untuk memicu pembungaan.
- b. Contoh: Gandum musim dingin dan lobak.

4. Air dan kekeringan:

Air adalah komponen penting untuk proses fisiologi seperti fotosintesis, transportasi nutrisi, dan pembelahan sel. Peran air adalah untuk menjaga turgor sel, yang penting untuk pertumbuhan dan pembentukan jaringan dan sebagai pelarut untuk mengangkut ion dan molekul. Defisiensi air (kekeringan) adalah kondisi kekurangan air menyebabkan penutupan stomata untuk mengurangi transpirasi, tetapi menghambat fotosintesis. Gen DREB (*Dehydration Responsive Element-Binding*) diaktifkan untuk meningkatkan toleransi terhadap kekeringan melalui pengaturan stomata dan sintesis osmolit.

5. Tekanan Osmotik

Tekanan osmotik menentukan pergerakan air masuk dan keluar dari sel tumbuhan. Plasmolisis adalah kejadian ketika tekanan osmotik tanah terlalu tinggi (salinitas tinggi), air keluar dari sel, menyebabkan sel tumbuhan kehilangan turgor. Penyerapan air dengan tekanan osmotik yang lebih rendah di dalam sel akar dibandingkan tanah mendorong masuknya air melalui osmosis.

6. Nutrisi

Kekurangan nitrogen mengaktifkan gen yang memfasilitasi penyerapan nitrogen, seperti gen pengatur enzim nitrogenase.

1.7.3 Peran Epigenetik dalam Adaptasi dan Pertumbuhan

Epigenetik merujuk pada perubahan ekspresi gen tanpa perubahan dalam urutan DNA. Perubahan ini berperan penting dalam adaptasi dan pertumbuhan tumbuhan (Ashar *et al.*, 2024):

1. Modifikasi histon:

- a. Histon dapat dimodifikasi melalui proses metilasi atau asetilasi untuk mengaktifkan atau menonaktifkan gen tertentu.
- b. Contoh: Modifikasi histon pada gen-gen toleransi stres abiotik seperti kekeringan.

2. Metilasi DNA:

- a. Penambahan gugus metil pada DNA dapat menekan ekspresi gen tertentu.
- b. Contoh: Metilasi gen pertahanan dalam situasi tanpa serangan patogen.

3. RNA non-koding:

- a. Molekul RNA kecil seperti mikroRNA (miRNA) dapat mengatur ekspresi gen pasca-transkripsi.
- b. Contoh: miRNA172 yang mengatur transisi dari fase vegetatif ke fase berbunga.

Epigenetik memungkinkan tumbuhan untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan, seperti mengubah pola pertumbuhan atau meningkatkan toleransi terhadap stres.

1.8 Respon Tumbuhan terhadap Faktor Lingkungan

Beberapa pengaruh faktor lingkungan dapat menunjukkan respon tumbuhan antara lain sebagai berikut (Hasmiati et al., 2017):

1. Pengaruh Cahaya (Fotoperiodisme dan Fototropisme)

Cahaya merupakan salah satu faktor lingkungan utama yang memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan melalui proses fotoresepsi.

2. Fotoperiodisme

Fotoperiodisme adalah respons tumbuhan terhadap durasi pencahayaan (panjang hari) dalam satu siklus 24 jam. Respons ini memengaruhi transisi dari fase vegetatif ke generatif, seperti pembungaan.

a. Jenis tumbuhan berdasarkan fotoperiodisme:

- 1) Tumbuhan hari pendek (SDP): Membutuhkan malam panjang untuk berbunga (contoh: padi, krisan).
- 2) Tumbuhan hari panjang (LDP): Membutuhkan malam pendek untuk berbunga (contoh: bayam, gandum).
- 3) Tumbuhan hari netral (DNP): Tidak bergantung pada panjang hari (contoh: tomat, bunga matahari).

b. Mekanisme fotoperiodisme:

- 1) Protein fitokrom (pigmen fotosensitif) memainkan peran utama.
- 2) Cahaya merah mengubah fitokrom ke bentuk aktif (Pfr), sedangkan cahaya merah jauh mengubahnya ke bentuk inaktif (Pr). Rasio Pfr/Pr menentukan apakah gen pembungaan akan diaktifkan.

3. Fototropisme

Fototropisme adalah gerakan pertumbuhan tumbuhan yang dipengaruhi oleh arah sumber cahaya:

a. Mekanisme:

- 1) Auksin (hormon tumbuhan) terdistribusi tidak merata pada sisi gelap batang, sehingga sel-sel pada sisi tersebut memanjang lebih cepat dibandingkan sisi terang.

- 2) Hasilnya adalah pertumbuhan batang menuju sumber cahaya.
- b. Signifikansi: Fototropisme membantu daun mendapatkan posisi optimal untuk menangkap cahaya matahari, meningkatkan efisiensi fotosintesis.

1.8.1 Mekanisme Adaptasi terhadap Stres Lingkungan

Tumbuhan memiliki strategi untuk bertahan dalam kondisi lingkungan yang tidak ideal (Agus *et al.*, 2024):

1. Stres kekeringan:
 - a. Penutupan stomata untuk mengurangi kehilangan air.
 - b. Produksi osmolit (seperti prolin) untuk menjaga tekanan osmotik.
2. Stres salinitas:
 - a. Mengakumulasi ion K^+ atau sintesis osmolit organik untuk menyeimbangkan tekanan osmotik.
 - b. Eksklusi ion Na^+ melalui pompa ion.
3. Stres suhu:
 - a. Produksi protein kejut panas (Heat Shock Proteins, HSP) untuk melindungi struktur protein.
 - b. Akumulasi senyawa antifreeze dalam kondisi dingin.
4. Stres cahaya:
 - a. Mengaktifkan pigmen pelindung (karotenoid) untuk mencegah kerusakan akibat radikal bebas yang dihasilkan oleh cahaya berlebih.
5. Senescence dan Dormansi

Senescence adalah proses penuaan terprogram yang menyebabkan degradasi jaringan atau organ tumbuhan, seperti daun atau bunga (Mar'atushaliha, 2023):

- a. Ciri utama:
 - 1) Penurunan fotosintesis.
 - 2) Degradasi klorofil (menyebabkan daun menguning).
 - 3) Redistribusi nutrisi dari organ tua ke organ muda atau biji.

- b. Mekanisme molekuler:
 - 1) Gen SAG (*Senescence-Associated Genes*): Mengatur ekspresi protein yang memecah komponen seluler, seperti klorofilase dan protease.
 - 2) Peningkatan produksi radikal bebas (ROS) memicu kerusakan molekul, seperti lipid dan DNA.
- c. Regulasi hormonal:
 - 1) Etilen dan asam absisat (ABA) mempercepat senescence.
 - 2) Sitokinin dapat menunda senescence dengan mempertahankan sintesis protein dan klorofil.

1.8.2 Regulasi Hormon dalam Dormansi Biji dan Kuncup

Dormansi adalah kondisi istirahat fisiologis di mana pertumbuhan dan metabolisme sangat rendah untuk menghadapi kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan (Avivi, 2021).

1. Dormansi biji:
 - a. Asam absisat (ABA): Hormon utama yang menginduksi dormansi dengan menekan sintesis enzim hidrolitik.
 - b. Giberelin (GA): Memecah dormansi dengan menginduksi sintesis enzim amilase untuk memecah pati menjadi gula saat perkecambahan.
2. Dormansi kuncup:
 - a. ABA menekan pertumbuhan tunas selama musim dingin.
 - b. Saat suhu meningkat, tingkat ABA menurun, dan sitokinin meningkat untuk memulai pertumbuhan.

Menurut Avivi (2021) strategi tumbuhan dalam mengatasi kondisi tidak menguntungkan antara lain:

1. Dormansi:
 - a. Strategi utama untuk menghindari kerusakan akibat musim dingin atau kekeringan.
 - b. Contoh: Tunas dorman pada pohon gugur.
2. Senescence terprogram:

Redistribusi nutrisi ke bagian yang lebih vital atau ke biji untuk memastikan kelangsungan hidup generasi berikutnya.

3. Resistensi genetik:

Ekspresi gen-gen yang mendukung ketahanan terhadap patogen, seperti gen R (*Resistance*).

4. Adaptasi fisiologis:

- a. Modifikasi stomata untuk mengatur transpirasi.
- b. Pengembangan struktur pelindung, seperti trikoma atau kutikula tebal.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, D. K., Zen, S., Dede Cahyati Sahrir, S. P. I., Fadhila, F., AK, A., Vertygo, S., ... & Arianto, S. (2021). Teori Biologi Sel. Yayasan Penerbit Muhammad Zaini.
- Agus Suprpto, S. P., MP, I., Nurliana, S., Ananto, S., Tati Hariyati, M. P., Mahdalena, M. P., ... & Fuskhah, I. E. (2024). DASAR BUDIDAYA TANAMAN. Cendikia Mulia Mandiri.
- Arumingtyas, E. L., Mastuti, R., & Hakim, L. (2021). Biologi Tanaman Hortikultura. Universitas Brawijaya Press.
- Arumingtyas, E. L., Mastuti, R., & Kusnadi, J. (2022). Fisio-genetik Perkembangan Tanaman Cabai. Universitas Brawijaya Press.
- Ashar, J. R., Farhanah, A., Simatupang, D. F., Friska, M., Ismayanti, R., & Hamzah, P. (2024). Genetika Tanaman. TOHAR MEDIA.
- Avivi, S. (2021). Buku Teks Fisiologi & Metabolisme Benih. UPT Penerbitan & Percetakan Universitas Jember.
- Damanhuri, D., Widodo, T. W., & Fauzi, A. (2022). Pengaturan keseimbangan nitrogen dan magnesium untuk meningkatkan pertumbuhan dan produksi jagung (*Zea Mays* L.). Jurnal Ilmiah Inovasi, 22(1), 10-15.
- Fauziah, A. (2021). Fisiologi Tumbuhan. Tulungagung: Biru Atmajaya.
- Firani, N. K. (2017). Metabolisme karbohidrat: tinjauan biokimia dan patologis. Universitas Brawijaya Press.
- Hasmiati, H., Jamilah, J., & Mustami, M. K. (2017). Aktivitas dan hasil belajar siswa pada pembelajaran pertumbuhan dan perkembangan dengan metode praktikum. Jurnal Biotek, 5(1), 21-35.
- Hidayat, R. (2020). MEKANISME KOMUNIKASI SEL. NoerFikri Offset. Palembang.
- Irawan, M. A. (2007). Glukosa & Metabolisme Energy. Sport Science Brief, 1(06).
- Mar'atushaliha, S. (2023). Fisiologi Tumbuhan. Penerbit NEM.
- Milawati Lalla, S. P. (2022). BIOSTIMULAN UNTUK TANAH DAN TANAMAN. Penerbit Qiara Media.

- Ningsih, M. S., Susilo, E., Rahmadina, R., Qolby, F. H., Tanjung, D. D., Anis, U., ... & Wisnubroto, M. P. (2024). Dasar-dasar fisiologi tumbuhan. Padang, Indonesia: CV Hei Publishing Indonesia.
- Pattipeilohy, M. (2024). Biologi Sel dan Molekuler. Biologi Sel dan Molekuler, 13.
- Rahmi, E., Taher, D. M., Agustina, T. P., Liunokas, A. B., & Mahendika, D. (2023). Biologi umum.
- Rasidi, S., & Nurtiyani, E. (2008). Batasan dan Ruang Lingkup Ekologi Tumbuhan. Ekologi Tumbuhan, 1927, 1-31.
- Sinaga, E. (2010). Biologi Molekuler Regulasi Ekspresi Gen.
- Song, A. N. (2012). Evolusi fotosintesis pada tumbuhan. Jurnal Ilmiah Sains, 28-34.
- Susilo, E., Friskia Hanatul, Q., Dian Diani, T., Ulfah, A., Eka Susila, N., Nurul Huda, P., ... & Muhammad Parikesit, W. (2024). Dasar-dasar fisiologi tumbuhan.
- Wardani, D. K., Panunggul, V. B., Ibrahim, E., Laeshita, P., Rachmawati, Y. S., Tuhuteru, S., & Nugrahani, R. A. G. (2023). Dasar Agronomi. TOHAR MEDIA.

BAB 2

SIFAT-SIFAT AIR DAN LARUTAN

Oleh Juhardi Sembiring

2.1 Pendahuluan

Air merupakan senyawa yang terdiri dari dua unsur, yaitu hidrogen (H) dan oksigen (O), dengan rumus kimia H_2O . Air adalah zat cair yang tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa pada suhu dan tekanan standar. Larutan merupakan campuran homogen yang terdiri dari dua zat atau lebih. Suatu larutan terdiri dari zat terlarut (solute) dan pelarut (solvent). Zat yang jumlahnya banyak biasanya disebut pelarut, sementara zat yang jumlahnya sedikit disebut zat terlarut. Tetapi ini tidak mutlak. Bisa saja dipilih zat yang lebih sedikit sebagai pelarut, tergantung pada keperluannya, tetapi di sini akan digunakan pengertian yang biasa digunakan untuk pelarut dan terlarut. Campuran yang dapat saling melarutkan satu sama lain dalam segala perbandingan dinamakan larutan „miscible“. Udara merupakan larutan miscible. Jika dua cairan yang tidak bercampur membentuk dua fasa dinamakan cairan “immiscible” (Nelson & Cox, 2004).

Air dan larutan alami memiliki banyak peran penting dalam kehidupan, baik di bumi maupun di berbagai proses biologis dan kimiawi. Air sangat esensial bagi makhluk hidup, digunakan untuk berbagai proses metabolisme tubuh, seperti pencernaan dan pengaturan suhu tubuh. Air juga memiliki fungsi untuk melarutkan zat, menjadikannya pelarut universal yang penting dalam banyak reaksi kimia, baik di alam maupun di laboratorium. Di bumi, air juga dapat ditemukan dalam bentuk gas (uap air) dan padat (es) (Advinda, 2018); (Lakitan, 2018)

2.2 Hubungan Air dan Tumbuhan

Konsep air pada tumbuhan sangat penting dalam kehidupan tumbuhan itu sendiri. Air berperan dalam berbagai proses biologis yang mendukung pertumbuhan dan kelangsungan hidup tumbuhan

(Pujiwati, 2018). Berikut adalah beberapa cara air berperan dalam kehidupan tumbuhan:

2.2.1 Proses Fotosintesis

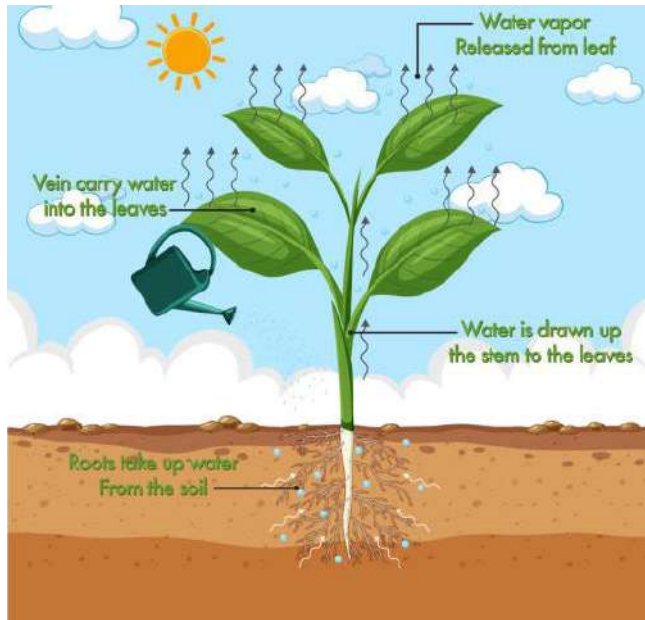
Air merupakan salah satu bahan penting dalam proses pertumbuhan tanaman terutama dalam proses fotosintesis. Dalam proses ini, tumbuhan menggunakan air (H_2O) dan karbon dioksida (CO_2) untuk menghasilkan glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dan oksigen (O_2), dengan bantuan cahaya matahari. Reaksi fotosintesis dapat digambarkan dengan rumus:



Di mana: 6 molekul karbon dioksida (CO_2) dan 6 molekul air (H_2O) digunakan untuk menghasilkan 1 molekul glukosa ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) dan 6 molekul oksigen (O_2) sebagai produk sampingan. Proses fotosintesis adalah kunci bagi kehidupan di bumi, karena menghasilkan oksigen dan juga menyediakan energi yang diperlukan oleh sebagian besar organisme hidup (Hopkins & Huner, 2009); (Kramer & Boyer, 1995)

2.2.2 Transpirasi

Penguapan air dari bagian tumbuhan, terutama daun. Air yang terserap melalui akar akan mengalir melalui batang ke daun, di mana sebagian besar akan menguap. Proses ini membantu mengatur suhu tubuh tumbuhan dan juga mengangkut mineral dan nutrisi yang terlarut dalam air. Transpirasi juga berfungsi dalam pengaturan suhu tanaman, karena penguapan air menyebabkan penurunan suhu yang dapat melindungi tanaman dari panas berlebihan. Selain itu, transpirasi memainkan peran penting dalam perpindahan air dan nutrisi dari akar ke daun, yang mendukung proses fotosintesis dan metabolisme tanaman. Proses transpirasi sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan, seperti suhu, kelembapan, kecepatan angin, dan Cahaya (Harahap, 2012).



Gambar 2.1. Ilustrasi Proses Penguapan air pada tumbuhan
(Sumber: www.istockphoto.com/id/ilustration/transpiration)

2.2.3 Penyerapan Nutrisi

Akar tumbuhan menyerap air dari tanah. Selain air, akar juga menyerap nutrisi dan mineral yang larut dalam air, yang kemudian disalurkan ke seluruh bagian tumbuhan untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan. Penyerapan nutrisi pada tumbuhan adalah proses yang kompleks dan melibatkan berbagai mekanisme yang saling berinteraksi. Nutrisi yang diserap oleh akar berperan penting dalam mendukung pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Proses ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti pH tanah, kelembaban, dan kesehatan akar. Oleh karena itu, pemeliharaan kondisi tanah yang baik sangat penting bagi kelangsungan hidup dan produktivitas tanaman.

2.2.4 Turgor Sel

Turgor sel merupakan tekanan yang dihasilkan oleh air yang masuk ke dalam vakuola sel tumbuhan, yang memberi kekuatan dan keteguhan pada dinding sel. Proses ini terjadi ketika air masuk ke dalam sel melalui osmosis, menyebabkan vakuola sel membesar dan

memberikan tekanan terhadap dinding sel. Tekanan turgor ini berfungsi untuk menjaga bentuk dan struktur sel agar tetap kaku dan tidak mudah mengerut.

Turgor sel sangat penting bagi tumbuhan karena membantu mempertahankan bentuk sel dan memberikan dukungan mekanik untuk bagian-bagian tumbuhan yang lebih besar, seperti daun dan batang. Jika tekanan turgor berkurang, misalnya akibat kehilangan air (dehidrasi), sel akan kehilangan kekakuannya dan menjadi layu.

2.2.5 Pengaturan Kelembapan

Air yang diserap oleh akar tumbuhan membantu menjaga kelembapan tanah di sekitarnya. Jika tanah kekurangan air, kelembapan tumbuhan akan menurun, dan jika tanah terlalu basah, tumbuhan mungkin akan mengalami kekurangan oksigen di akar. Oleh karena itu, air yang cukup dalam tanah sangat penting untuk menjaga keseimbangan kelembapan tumbuhan.

2.3 Sifat-sifat Air yang Berperan pada Tumbuhan

Air bersumber dari alam, baik saat turun sebagai hujan, air yang mengalir di sungai, atau perlu diambil dengan bantuan mesin bor. Pentingnya air bagi kehidupan membuat hampir semua makhluk hidup. Tanaman memerlukan air untuk bertahan hidup dan selalu berkembang menghasilkan pohon yang lebih tinggi, menghasilkan daun, biji, dan buah dengan sempurna.

Jika air tidak tersedia, maka proses tanaman untuk bertumbuh kemudian akan terhambat serta menjadi kerdil. Kandungan air dalam tumbuhan sekitar 80 persen dari berat kering tanaman. Itulah mengapa air menjadi komponen pada tumbuhan yang tidak dapat diabaikan.

Bahkan apabila akar tidak dapat menemukan air dalam jangka waktu lama, tumbuhan akan mengering dan kemudian mati karena kekurangan air. Air memiliki beberapa karakteristik serta sifat khusus sehingga menjadi salah satu komponen penting dari seluruh kehidupan salah satunya adalah pada tumbuhan.

Secara keseluruhan, sifat-sifat air dalam tumbuhan berperan krusial dalam mendukung kehidupan tumbuhan, menjaga keseimbangan internalnya, dan memungkinkan proses fisiologis

penting seperti fotosintesis dan transportasi air. Terdapat delapan sifat air yang berperan pada tumbuhan antara lain: Kohesi (keterikatan antar molekul air); Adhesi (Tarikan antara Molekul air dan permukaan lain); Memiliki Polaritas; Permukaan Tegangan; Kemampuan melarutkan Zat (air memiliki kemampuan tinggi dalam melarutkan berbagai zat termasuk mineral dan garam yang dibutuhkan tumbuhan);

2.3.1 Kohesi

Kohesi sering disebut juga sebagai keterikatan antar molekul air. Kohesi merupakan sifat air untuk saling tarik menarik antar molekulnya sendiri. Sifat ini sangat penting untuk mempertahankan aliran air dalam xilem (saluran pengangkut air) tumbuhan. Kohesi memungkinkan air naik ke atas melalui batang dan daun, meskipun melawan gravitasi.

2.3.2 Adhesi

Adhesi merupakan tarikan antara molekul air dan permukaan lain. Gaya adhesi pada tumbuhan sesungguhnya terjadi pada dinding xilem. Gaya adhesi pada tumbuhan kemudian akan mengakibatkan kapilaritas pada tumbuhan serta akan menyebabkan naiknya cairan ke dalam tabung sempit tumbuhan.

2.3.3 Memiliki Polaritas

Air dengan sifat polaritas yang kemudian akan memungkinkannya untuk mengubah bentuknya setelah melewati xilem pada tumbuhan. Setelah melewati xilem, air kemudian akan berubah menjadi bentuk tetesan karena sifat polaritas yang ia miliki.

2.3.4 Permukaan Tegangan

Permukaan tegangan disebabkan oleh kohesi molekul air pada permukaannya. Sifat ini memungkinkan air membentuk tetesan kecil dan memungkinkan tanaman untuk menarik air ke dalam akar melalui proses osmosis).

2.3.5 Kemampuan Melarutkan Zat

Air dianggap sebagai pelarut universal karena struktur molekul dan sifat kimianya yang unik. Air adalah molekul polar, artinya ia memiliki muatan parsial negatif di salah satu ujungnya dan sebagian bermuatan positif di ujung lainnya. Polaritas ini memungkinkan air berinteraksi dan melarutkan berbagai jenis zat terlarut. Ketika zat terlarut, seperti garam atau gula, ditambahkan ke air, molekul air polar mengelilingi dan memisahkan masing-masing ion atau molekul zat terlarut. Hal ini terjadi karena muatan positif parsial molekul air tertarik ke ion negatif zat terlarut dan muatan negatif parsial molekul air tertarik ke ion positif zat terlarut.

Interaksi ini memecah zat terlarut dan membiarkannya larut dalam air. Selain itu, air mampu membentuk ikatan hidrogen, yang memberikan daya tarik kuat antara atom hidrogen bermuatan positif dari satu molekul air dan atom oksigen bermuatan negatif dari molekul air lainnya. Sifat ini memungkinkan air melarutkan banyak zat terlarut polar, seperti alkohol, asam, dan beberapa senyawa organik.

Secara keseluruhan, sifat polar dan kemampuannya membentuk ikatan hidrogen menjadikan air sebagai pelarut yang sangat baik untuk berbagai macam zat, menjadikannya komponen penting dalam banyak proses alam dan industri.

2.4 Sifat Larutan pada Tumbuhan

Sifat larutan dalam tumbuhan sangat berhubungan dengan proses fisiologis yang mendasari hidup tumbuhan. Larutan ini memengaruhi pengaturan air, distribusi nutrisi, transportasi zat dalam sistem vaskular, serta kestabilan pH dan osmosis yang mendukung berbagai fungsi sel dan jaringan dalam tumbuhan.

Sifat larutan pada tumbuhan merujuk pada berbagai aspek kimiawi dan fisik larutan yang ada dalam tubuh tumbuhan dan bagaimana larutan tersebut mempengaruhi proses-proses fisiologis di dalam tumbuhan. Beberapa sifat larutan yang penting dalam tumbuhan antara lain:

2.4.1 Konsentrasi Larutan

Konsentrasi larutan pada tumbuhan mempengaruhi berbagai proses biokimia. Misalnya, larutan dalam sel tumbuhan seperti vakuola memiliki konsentrasi tertentu dari garam dan zat terlarut lainnya yang membantu menjaga keseimbangan osmosis. Konsentrasi larutan yang tepat juga penting untuk proses penyerapan air dan zat hara melalui akar.

2.4.2 Tegangan Permukaan

Tegangan permukaan larutan dalam tumbuhan, seperti pada air dalam xilem (saluran pembuluh tumbuhan), memainkan peran penting dalam transportasi air melalui tanaman. Air dalam xilem sering berada dalam keadaan yang tertekan atau memiliki tegangan permukaan tinggi, yang membantu air naik dari akar ke daun.

2.4.3 Osmosis

Osmosis adalah proses perpindahan air dari larutan yang memiliki konsentrasi zat terlarut rendah (air murni) ke larutan yang memiliki konsentrasi zat terlarut tinggi (larutan garam atau gula) melalui membran semipermeabel. Proses ini penting untuk menjaga turgor sel, keseimbangan air dalam sel, dan transportasi air serta zat terlarut ke seluruh bagian tumbuhan.

2.4.4 Tekanan Turgor

Larutan di dalam vakuola sel tumbuhan memiliki tekanan turgor yang memberi tekanan pada dinding sel, menjaga bentuk dan kekuatan sel. Tekanan turgor berfungsi untuk menjaga kestabilan struktur tumbuhan dan memfasilitasi proses transportasi air dan nutrisi.

2.4.5 pH Larutan

pH larutan dalam tumbuhan sangat penting untuk aktivitas enzim dan berbagai reaksi kimia dalam metabolisme tumbuhan. Misalnya, larutan dalam sel tumbuhan memiliki pH yang relatif netral atau sedikit asam untuk mendukung proses fotosintesis, respirasi, dan aktivitas enzimatik lainnya.

2.4.6 Larutan Nutrisi

Zat-zat hara yang terlarut dalam air, seperti nitrogen, fosfor, kalium, kalsium, magnesium, dan unsur mikro lainnya, sangat penting bagi tumbuhan untuk pertumbuhannya. Larutan ini diserap melalui akar dan kemudian diangkut ke berbagai bagian tumbuhan untuk digunakan dalam proses metabolisme dan pembentukan struktur tumbuhan.

DAFTAR PUSTAKA

- Advinda, L. 2018. Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan. Yogyakarta: Deepublish.
- Campbell, Neil A. Jane B. Reece., dkk. 2008. Biologi Campbell. Jakarta: Erlangga.
- Harahap, F. 2012. Fisiologi Tumbuhan: Suatu Pengantar. Medan: UNIMED.
- Hopkins, W.G. and Huner, N.P.A. 2009. Introduction to Plant Physiology. (4th Edition). Bab 1 dan 2. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kramer, P.J. and Boyer, J.S. 1995. Water Relations of Plants and Soils. London: Academic Press.
- Lakitan, B. 2018. Dasar- dasar Fisiologi Tumbuhan. Depok: Rajawali Pers.
- Maurel, C. 1997. Aquaporins and Water Permeability of Plant Membranes. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 48: 399-429.
- Nelson, D.L. and Cox, M.M. 2004. Lehninger Principles of Biochemistry 4th Edition. W. H. Freeman & Company.
- Pujiwati, I. 2018. Pengantar Fisiologi Tumbuhan. Malang: Intimedia.
- Salisbury, F. B. & Ross, C. W. 1995. Fisiologi Tumbuhan Jilid 3. Bandung: ITB.
- Sasmitamihardja, D. & Arbayah H. S. 2009. Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan. Jakarta: Erlangga.
- Taiz, L. & Eduardo Z. 2002. Plant Physiology 3rd ed. English: Sinauer Associates
- Yahya. 2015. "Perbedaan Tingkat Laju Osmosis Antara Umbi Solonum tuberosum dan Doucus carota". Biology Education, 4 (1).
- Taiz, L. and Zeiger E. 2002. Plant Physiology (3th Edition). Bab 3. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers.

BAB 3

HUBUNGAN AIR DENGAN TUMBUHAN

Oleh Didi Carsidi

3.1 Pendahuluan

Air adalah salah satu komponen esensial bagi kehidupan tumbuhan. Tanpa air, tumbuhan tidak dapat melakukan proses fisiologis penting seperti fotosintesis, transportasi nutrisi, dan pertumbuhan. Hubungan antara air dan tumbuhan sangat erat dan memainkan peran vital dalam siklus hidup tumbuhan. Di dalam bab ini, akan dijelaskan bagaimana air berperan dalam berbagai proses tumbuhan dan mengapa ketersediaan serta kualitas air sangat mempengaruhi kesehatan tanaman.

3.2 Peran Air dalam Fisiologi Tumbuhan

Air memiliki berbagai fungsi penting dalam kehidupan tumbuhan, di antaranya:

3.2.1 Sebagai Pelarut dan Media Transportasi

Air merupakan pelarut universal yang memungkinkan berbagai zat terlarut seperti mineral dan nutrisi yang dibutuhkan oleh tumbuhan untuk diserap dan didistribusikan ke seluruh bagian tanaman melalui jaringan pembuluh. Proses ini dikenal sebagai transpirasi dan transportasi air, yang terjadi melalui jaringan xilem, membawa air dan mineral dari akar menuju daun. Menurut Salisbury dan Ross (1992), air merupakan komponen utama yang dibutuhkan tumbuhan untuk menjaga turgiditas sel, sehingga tumbuhan tetap tegak dan mampu menyerap nutrisi secara optimal. Selain air, nutrisi seperti nitrogen, fosfor, dan kalium diperlukan untuk mendukung pertumbuhan tumbuhan. Air berperan sebagai medium transportasi yang membawa nutrisi dari tanah melalui akar ke seluruh bagian tumbuhan. Nutrisi ini sangat penting dalam

pembentukan protein, asam nukleat, dan energi. Studi Kasus: Pada tanaman padi (*Oryza sativa*), pemberian nutrisi yang tepat bersama air sangat mempengaruhi hasil panen. Misalnya, defisiensi nitrogen dapat menyebabkan daun menjadi kekuningan dan pertumbuhan tanaman terhambat. Pengelolaan air yang baik, seperti sistem pengairan yang efisien, memungkinkan tanaman mendapatkan nutrisi yang cukup melalui tanah yang basah secara optimal. Menurut penelitian Horie et al. (2005), ketersediaan air yang cukup memungkinkan optimalisasi penyerapan nitrogen, yang secara langsung meningkatkan fotosintesis dan produktivitas tanaman padi di ekosistem sawah beririgasi.



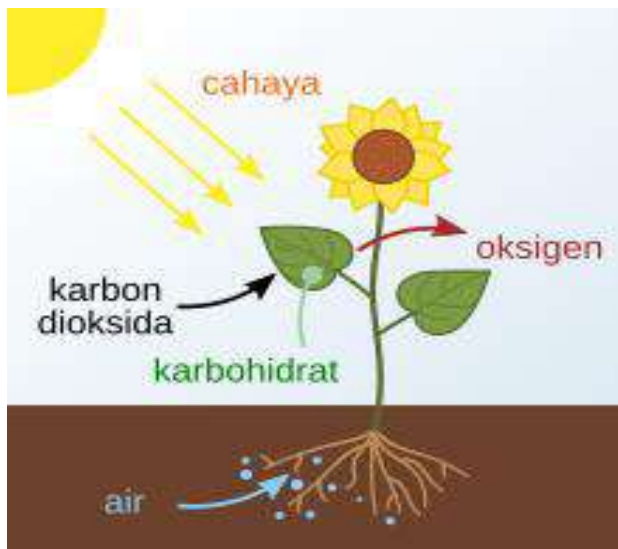
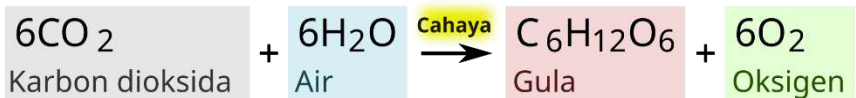
Gambar 3.1. Proses Transpirasi

(Sumber : <https://depositphotos.com/id/vector/diagram-showing-transpiration-in-plant-319233662.html>)

3.2.2 Fotosintesis

Air juga berperan dalam reaksi fotosintesis, di mana tumbuhan menggunakan cahaya matahari untuk mengubah air dan karbon dioksida menjadi gula dan oksigen. Proses fotosintesis berlangsung di daun, tepatnya pada kloroplas, yang merupakan

tempat berlangsungnya reaksi kimia fotosintesis. Hopkins dan Hüner (2004) menjelaskan bahwa air diperlukan sebagai sumber elektron dalam reaksi fotokimia pada fotosintesis, terutama dalam proses **fotolisis** atau pemecahan molekul air menjadi oksigen.



Gambar 3.2. Proses Fotosintesis

(Sumber : <https://id.wikipedia.org/wiki/Fotosintesis>)

3.2.3 Menjaga Turgiditas dan Struktur sel

Sel tumbuhan bergantung pada air untuk mempertahankan bentuk dan strukturnya. Air memberikan tekanan pada dinding sel, yang dikenal sebagai **tekanan turgor**, sehingga sel tetap kaku dan tanaman tetap tegak. Kekurangan air akan menyebabkan hilangnya tekanan turgor, yang mengakibatkan layunya tanaman. Kramer dan Boyer (1995) menunjukkan bahwa tekanan turgor sel sangat penting untuk mempertahankan integritas struktural tumbuhan, terutama pada tanaman yang tumbuh di lingkungan kering.

3.2.4 Pengatur Suhu

Air berperan dalam mengatur suhu internal tumbuhan melalui proses transpirasi, yaitu penguapan air dari stomata di daun. Transpirasi membantu mendinginkan daun saat suhu lingkungan meningkat. Saat air menguap, panas dari daun juga ikut terbawa sehingga menjaga tanaman dari stres panas. Taiz dan Zeiger (2010) menjelaskan bahwa proses transpirasi pada daun mirip dengan pendinginan evaporatif, yang membantu tanaman mengontrol suhu internalnya, terutama di lingkungan panas dan kering.



Gambar 3.3. Mekanisme Cekaman Kekeringan

(Sumber : <http://thophick.blogspot.com/2012/09/seleksi-in-vitro-terhadap-cekaman.html>)

3.3 Siklus Air di Tumbuhan

Siklus air pada tumbuhan dimulai dari penyerapan air melalui akar, di mana air bergerak dari tanah ke dalam sel-sel akar melalui proses osmosis. Setelah itu, air diangkut melalui jaringan xilem menuju daun untuk digunakan dalam fotosintesis atau dikeluarkan melalui transpirasi. Air yang tidak digunakan oleh tumbuhan dilepaskan ke atmosfer sebagai uap air, membentuk bagian dari siklus hidrologi. Menurut Taiz dan Zeiger (2010), siklus air dalam tumbuhan berperan penting dalam menghubungkan ekosistem darat dengan atmosfer, terutama melalui proses transpirasi yang menyediakan uap air bagi pembentukan awan dan curah hujan.

Setelah air diserap oleh akar, air bergerak melalui dua jalur utama:

1. **Jalur Apoplas:** Air bergerak di antara sel dan dinding sel menuju jaringan xilem.
2. **Jalur Simplas:** Air bergerak melalui sitoplasma sel, melewati plasmodesmata.

Proses ini memungkinkan pengangkutan air yang efisien menuju daun. Dari daun, sebagian air digunakan untuk fotosintesis dan sebagian besar dilepaskan melalui transpirasi. Transpirasi juga berfungsi untuk menciptakan gaya kapiler yang menarik air lebih jauh ke atas melalui batang. Studi Kasus: Daerah Tumbuhan Xerofit Di daerah kering seperti gurun, tanaman xerofit (misalnya kaktus) memiliki adaptasi unik dalam siklus air. Stomata mereka hanya terbuka pada malam hari untuk mengurangi kehilangan air akibat penguapan. Mereka juga memiliki sistem akar yang luas dan dangkal untuk menyerap air secara cepat ketika ada hujan singkat. Nobel (2009) menjelaskan bahwa stomata pada tanaman xerofit diaktifkan pada malam hari (proses fotosintesis CAM) sebagai bentuk adaptasi terhadap kekurangan air, mengurangi penguapan selama suhu tinggi di siang hari.

3.4 Stres air pada Tumbuhan

Ketika tanaman tidak mendapatkan air yang cukup, mereka mengalami **stres air**, yang dapat menyebabkan gangguan fisiologis. Salah satu respon adaptif tanaman terhadap stres air adalah penutupan stomata untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi. Namun, hal ini juga dapat menghambat proses fotosintesis, yang memerlukan karbon dioksida dari atmosfer. Berdasarkan penelitian Levitt (1980), stres air mempengaruhi berbagai aspek pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Tanaman yang sering mengalami kekurangan air cenderung menunjukkan penurunan pertumbuhan dan hasil panen yang signifikan. Stres air pada tanaman, yang disebabkan oleh kurangnya ketersediaan air, memicu respons fisiologis yang dapat merusak tanaman. Respons utama terhadap stres air adalah penutupan stomata untuk mengurangi penguapan. Namun, penutupan stomata juga mengurangi penyerapan karbon dioksida, yang dibutuhkan untuk

fotosintesis. Hal ini menyebabkan penurunan hasil fotosintesis dan pertumbuhan tanaman.

Efek Stres Air Jangka Panjang

1. **Pengurangan Pertumbuhan Akar:** Kekurangan air secara kronis dapat menyebabkan penurunan pertumbuhan akar, yang mengurangi kemampuan tanaman untuk menyerap air dan nutrisi.
2. **Penurunan Produksi Bunga dan Buah:** Stres air pada fase reproduktif dapat menyebabkan penurunan jumlah bunga dan buah yang dihasilkan, mengurangi produktivitas tanaman secara keseluruhan.

Studi Kasus: Tanaman Jagung (*Zea mays*) Pada tanaman jagung, stres air yang terjadi selama fase pembungaan dapat menurunkan hasil panen hingga 50%. Tanaman jagung memerlukan air yang cukup selama fase pertumbuhan vegetatif dan fase berbunga. Di daerah dengan curah hujan yang tidak menentu, teknik irigasi tetes dapat membantu mencegah kerusakan akibat stres air. Penelitian oleh Passioura (2007) menunjukkan bahwa pengelolaan air yang baik pada tanaman jagung di fase kritis pembungaan dan pengisian biji dapat secara signifikan meningkatkan hasil panen di lahan kering.

3.5 Adaptasi Tumbuhan terhadap Kekurangan Air

Beberapa jenis tumbuhan telah mengembangkan mekanisme adaptasi untuk bertahan hidup di lingkungan yang kering. Contohnya adalah tumbuhan xerofit, yang mampu menyimpan air dalam jaringan khusus, seperti pada kaktus, atau tumbuhan dengan daun yang kecil atau berlapis lilin yang mengurangi penguapan air. Menurut Nobel (2009), banyak tumbuhan xerofit, seperti kaktus, memiliki adaptasi fisiologis dan morfologis yang memungkinkan mereka bertahan di lingkungan dengan pasokan air yang sangat terbatas. Misalnya, stomata mereka hanya terbuka pada malam hari untuk mengurangi kehilangan air selama fotosintesis.

Selain tanaman xerofit, banyak tumbuhan lain mengembangkan strategi adaptasi terhadap kekurangan air:

3.5.1 Perubahan Morfologi Daun

Tanaman di daerah kering sering kali memiliki daun yang lebih kecil, tebal, atau berlapis lilin untuk mengurangi penguapan air. Beberapa tanaman bahkan mengubah orientasi daun mereka agar tidak terkena sinar matahari langsung. Studi Kasus: Daun Sukulen, seperti Aloe vera, memiliki daun tebal dan berdaging yang mampu menyimpan air dalam jumlah besar. Jaringan-jaringan daun ini mampu menyimpan air selama periode panjang tanpa hujan, yang memungkinkan tanaman bertahan di lingkungan yang kering. Gindaba et al. (2005) menemukan bahwa sukulen, melalui modifikasi morfologis seperti penebalan daun dan lapisan lilin, memiliki kemampuan adaptif yang lebih baik dalam mengurangi kehilangan air di lingkungan semi-arid.

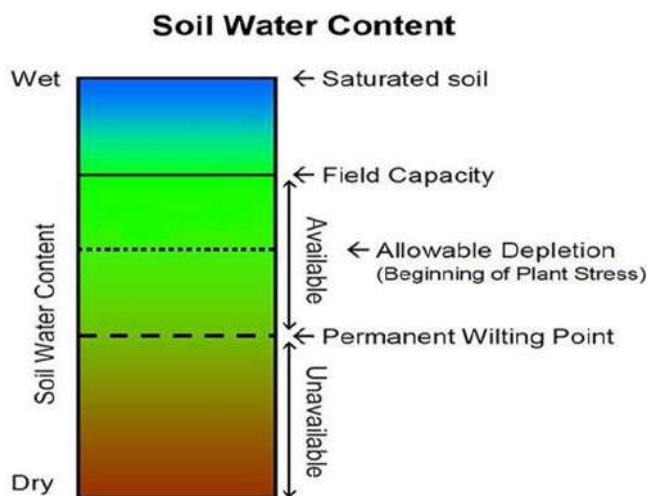
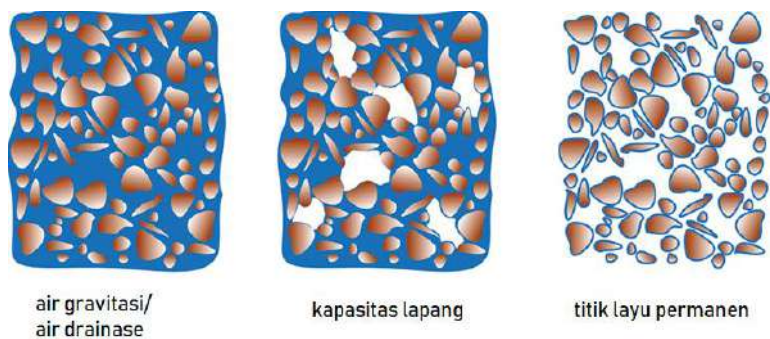
3.5.2 Sistem Akar yang Dalam

Beberapa tanaman, seperti pohon akasia di padang pasir, memiliki sistem akar yang sangat dalam, yang memungkinkan mereka mengakses sumber air yang tidak terjangkau oleh tanaman lain. Sistem akar ini memungkinkan mereka bertahan di musim kemarau yang Panjang. Studi Kasus: Akasia di Gurun Pohon akasia di Gurun Sahara memiliki akar yang dapat menjangkau kedalaman lebih dari 20 meter untuk mendapatkan air dari lapisan bawah tanah. Akar yang dalam ini memungkinkan pohon tersebut bertahan hidup meskipun curah hujan sangat rendah. Menurut penelitian oleh Canadell et al. (1996), pohon akasia dengan sistem akar yang dalam menunjukkan kemampuan untuk bertahan dalam kondisi kekeringan ekstrem di gurun, dimana tanaman lain gagal bertahan.

3.6 Interaksi antara, air dan Tumbuhan

Tumbuhan memerlukan air yang disimpan dalam tanah dan kemudian diserap untuk memenuhi kebutuhan evapotranspirasi (ETc). Saat curah hujan rendah, tanaman harus mengandalkan air yang tersimpan di pori-pori tanah atau cadangan air yang terbatas di jaringan tumbuhan untuk bertahan hidup. Jika air tidak tersedia, hal ini akan berdampak buruk pada fungsi fisiologis tumbuhan. Kekeringan yang berkelanjutan dapat menyebabkan kerusakan permanen dan kematian tumbuhan. Oleh karena itu, tumbuhan

perlu menyeimbangkan antara kebutuhan air dan ketersediaan air di sekitarnya. Karena evapotranspirasi terus berlangsung, irigasi diperlukan untuk menjaga pasokan air bagi tumbuhan (Rosadi, 2015).



Gambar 3.4. Kandungan Air Tanah

(<https://rizosfir.wordpress.com/2018/02/22/air-tersedia-bagi-tanaman/> dan Maughan et al., (2015))

3.7 Pengelolaan Air dalam Pertanian

Dalam pertanian modern, pengelolaan air merupakan kunci untuk mencapai produktivitas tanaman yang optimal. Beberapa teknik yang umum digunakan adalah:

1. **Irigasi Tetes:** Teknik ini memberikan air langsung ke zona akar tanaman secara perlahan, mengurangi penguapan air dan meningkatkan efisiensi penggunaan air.
2. **Irigasi Permukaan:** Air dialirkan melalui permukaan tanah, meskipun teknik ini cenderung memiliki tingkat penguapan yang lebih tinggi.
3. **Penampungan Air Hujan:** Beberapa sistem pertanian mengandalkan penampungan air hujan sebagai sumber air irigasi, terutama di daerah yang curah hujannya tidak teratur.

Studi Kasus: Penggunaan Irigasi di Lahan Padi Irigasi tetes mulai digunakan dalam budidaya tanaman padi di beberapa wilayah yang memiliki masalah kekurangan air. Teknik ini memungkinkan penggunaan air yang lebih efisien dibandingkan sistem irigasi konvensional. Studi di Indonesia menunjukkan bahwa teknik ini menghemat hingga 40% air tanpa mengurangi hasil panen. Kajian oleh Bouman et al. (2007) mengungkapkan bahwa sistem irigasi alternatif seperti "Alternate Wetting and Drying" (AWD) pada tanaman padi dapat menghemat air secara signifikan sambil tetap mempertahankan produktivitas tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., & Barker, R. (2007). Rice and water. *Advances in Agronomy*, 92, 187-237.
- Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., et al. (1996). Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108(4), 583-595.
- Gindaba, J., Rozanov, A., & Negash, L. (2005). Response of seedlings of two Eucalyptus and three deciduous tree species from Ethiopia to severe water stress. *Forest Ecology and Management*, 205(1-3), 127-138.
- Hopkins, W.G., & Hüner, N.P.A. (2004). *Introduction to Plant Physiology*. 3rd edition. John Wiley & Sons.
- Horie, T., Shiraiwa, T., & Homma, K. (2005). Physiological characteristics of high-yielding rice inferred from cross-location experiments. *Field Crops Research*, 95(2-3), 197-209.
- Kramer, P.J., & Boyer, J.S. (1995). *Water Relations of Plants and Soils*. Academic Press.
- Levitt, J. (1980). *Responses of Plants to Environmental Stresses*. Academic Press.
- Maughan, T., Drost, D., & Allen, L. N. (2015). Vegetable Irrigation : Squash and Pumpkin. June.
- Nobel, P.S. (2009). *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. 4th edition. Elsevier.
- Passioura, J.B. (2007). The drought environment: physical, biological and agricultural perspectives. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 113-117.
- Rosadi, B. 2015. Dasar-dasar Teknik Irigasi. Graha Ilmu. Yogyakarta. 89 hal.
- Salisbury, F.B., & Ross, C.W. (1992). *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology*. 5th edition. Sinauer Associates.

BAB 4

PROSES FOTOSINTESIS

Oleh Alianto

4.1 Pendahuluan

Fotosintesis atau disebut juga asimilasi karbondioksida oleh tumbuhan hijau merupakan suatu peristiwa yang sangat penting terutama dalam pertumbuhan dan perkembangan organisme. Pembentukan zat-zat organik dari zat anorganik yang terjadi akibat fotosintesis mencerminkan suatu keharusan mutlak bagi kehidupan organisme yang tidak dapat berfotosintesis. Secara langsung maupun tidak langsung fotosintesis dapat mempengaruhi kehidupan di bumi. Berdasarkan pertimbangan ini maka dapat dikatakan bahwa tumbuhan mendahului kehidupan lainnya, seperti hewan yang membutuhkan akan zat-zat organik tergantung pada tumbuhan (heterotrof).

Proses fotosintesis terjadi pada organisme yang cukup luas pada tumbuhan prokariotik maupun eukariotik. Proses fotosintesis pada tumbuhan eukariotik terjadi bukan saja pada tumbuhan bersel satu atau berkoloni yang berwarna hijau. Fotosintesis terjadi pula pada tumbuhan lainnya seperti pada alga berwarna hijau maupun yang berwarna coklat dan merah dan juga terdapat pada *Euglena*, *Dinoflagellata* dan *Diatomae*. Proses fotosintesis pada tumbuhan prokariotik terjadi pada tumbuhan air tawar maupun laut dan sanggup hidup dari karbondioksida atau nitrogen dari udara (atmosfer). Itulah sebabnya fotosintesis merupakan dasar utama dalam fisiologi yang erat hubungannya dengan kehidupan.

Fotosintesis sebagai suatu peristiwa fisiologi diketahui sebagai suatu proses yang dipengaruhi oleh faktor fisik (cahaya, suhu, tekanan osmotik) dan kimia (pH dan nutrien) sebagai suatu respon adaptif dari lingkungannya. Disamping itu, morfologi tumbuhan atau selnya merupakan salah satu hal yang tidak dapat dipisahkan sebagai salah satu faktor biologi yang mempengaruhinya. Oleh karena itu, setiap faktor lingkungan dapat menimbulkan hubungan

timbal balik terhadap respon fisiologi yang bervariasi sesuai dengan tingkatan tekanan yang diperolehnya (Dawson, 1966).

4.2 Asal Usul Kata Fotosintesis

Istilah atau kata fotosintesis berasal dari bahasa Yunani, yaitu foto yang berarti cahaya dan sintesis berarti penggabungan. Kata fotosintesis pertama kali diperkenalkan pada 1779 oleh seorang ilmuwan asal Inggris bernama Jan Ingenhousz (Qothrunnada, 2021). Percobaan Jan Ingenhousz menemukan proses fotosintesis dilakukan oleh tumbuhan hijau yang memerlukan cahaya matahari dan menyerap karbondioksida (CO_2) untuk menghasilkan oksigen. Hasil percobaan dari Jan Ingenhousz merupakan definisi sederhana dari fotosintesis yang masih berlaku dan digunakan sampai sekarang.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan yang semakin pesat beberapa dekade terakhir menyebabkan definisi fotosintesis yang diperoleh dari beberapa hasil percobaan berbeda satu dengan lainnya. Walaupun demikian, makna dari beberapa definisi fotosintesis tersebut secara umum adalah sama. Berdasarkan ini maka secara umum fotosintesis dapat didefinisikan sebagai suatu proses biokimia pembentukan karbohidrat dan pelepasan oksigen dari bahan anorganik termasuk air (H_2O) dan karbondioksida (CO_2) yang dilakukan oleh tumbuhan, terutama tumbuhan yang mengandung zat hijau daun (klorofil) dengan bantuan cahaya matahari.

4.3 Organisme Pelaku Fotosintesis

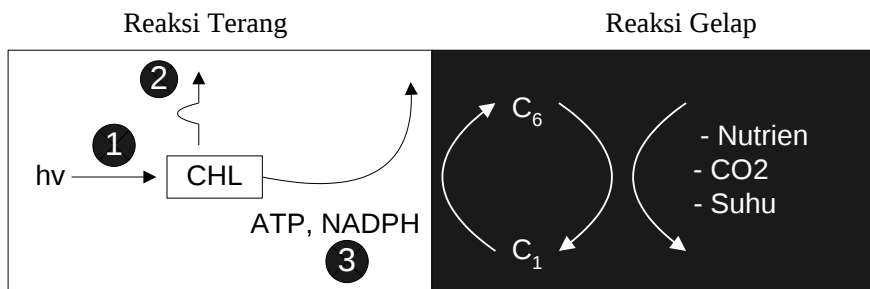
Tumbuhan baik tumbuhan tingkat tinggi maupun rendah yang memiliki klorofil dapat melakukan fotosintesis (Rahma, 2024). Tumbuhan tingkat tinggi merupakan tumbuhan yang memiliki pembuluh dan jelas dapat dibedakan antara akar, batang dan daun. Tumbuhan tingkat rendah tidak memiliki pembuluh, akar, batang dan daun. Contoh penerapan pengukuran fotosintesis pada tumbuhan tingkat rendah seperti fitoplankton di perairan teluk Banten (Alianto et al., 2008) dan bagian luar teluk Wondama (Alianto et al., 2018). Umumnya tumbuhan yang dapat melakukan fotosintesis bersifat autotrof. Autotrof artinya tumbuhan yang dapat

membuat makanan sendiri dengan memanfaatkan air dan karbondioksida dengan bantuan cahaya matahari. Hasil dari autotrof ini yang dimanfaatkan oleh heterotrof (hewan dan manusia).

4.4 Proses Fotosintesis Secara Umum

Proses utama dalam fotosintesis terjadi di dalam kloroplas. Lambers et al. (1998) mengemukakan bahwa proses pada fotosintesis terdapat tiga proses utama yang dapat dibedakan satu dengan lainnya seperti diuraikan berikut:

1. Absorpsi foton oleh pigmen, proses ini sebagian besar dilakukan oleh klorofil yang tergabung dalam 2 fotosistem. Pigmen tersebut melekat dalam struktur internal membran (tilakoid) dan menyerap sebagian besar energi Photosynthetically Active Radiation (PAR; 400 – 700 nm). Energi tersebut ditransfer ke pusat reaksi fotosistem saat mulainya proses kedua.
2. Elektron yang diperoleh dari pemisahan air bersama dengan produksi oksigen yang di transpor sepanjang rantai transpor-elektron yang melekat pada membran tilakoid. Produksi NADPH dan ATP dalam proses ini digunakan pada proses ketiga. Karena reaksi kedua sangat tergantung pada energi cahaya, dan dinamakan "*reaksi terang*" dalam fotosintesis (Gambar 4.1).
3. NADPH dan ATP yang digunakan dalam fotosintesis untuk mereduksi karbon (siklus Calvin) dimana CO₂ diasimilasi sampai sintetis senyawa triose-fosfat. Proses ini dapat terjadi dengan tidak adanya cahaya dan dinamakan dengan "*reaksi gelap*" dalam fotosintesis (Gambar 4.1).

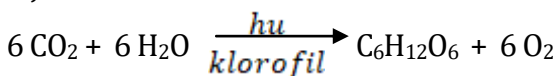


Gambar 4.1. Reaksi terang dan gelap dalam fotosintesis
(sumber: Yentsch, 1994)

Dari Gambar 4.1 tersebut dapat dikatakan bahwa bagian 1-2 merupakan foton terpenting dari khlorofil; bagian 1-3 merupakan reduksi energi yang diperlukan untuk memfasilitasi fiksasi karbon. Pada reaksi gelap terlihat bahwa enzim dalam fiksasi karbon sangat sensitif dengan suhu dan tidak adanya karbondioksida dan nutrien, seperti nitrogen dan fosfor.

4.4.1 Absorpsi Cahaya Dalam Fotosintesis

Secara umum proses fotosintesis di bagi dalam 2 tingkat yang dijelaskan oleh reaksi fotosintesis berikut:



Reaksi pertama menunjukkan adanya absorpsi energi cahaya oleh pigmen tumbuhan, yaitu klorofil yang merubah (konversi) energi fisika cahaya menjadi energi kimia pada ATP dan zat reduktor NADPH. Dalam proses ini atom hidrogen dipindahkan dari molekul air ke NADP^+ yang kemudian direduksikan menjadi NADPH sambil mengeluarkan molekul oksigen sebagai hasil proses fotosintesis pada tumbuhan dan secara simultan merubah ADP melalui fosforisasi menjadi ATP. Reaksi pertama ini dapat disimpulkan sebagai berikut :



Reaksi kedua terjadi kumulatif hasil energi dari reaksi pertama, yaitu pengumpulan ATP dan NADPH yang kemudian dipakai sebagai sumber reduksi karbondioksida untuk menjadi

glukosa dan juga secara simultan mereoksidasi NADPH menjadi NADP^+ , sedangkan ATP diuraikan lagi menjadi ADP dan fosfat anorganik. Reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut :



Reaksi ini menunjukkan adanya reaksi yang konvensional, akibat pengaruh enzim tanpa mempergunakan cahaya matahari. Adanya konversi karbondioksida menjadi glukosa, karena pengaruh enzim yang katalis dalam reaksi kedua proses fotosintesis. Jika ditinjau lebih lanjut reaksi-reaksi tersebut, maka reaksi pertama fotosintesis adalah akibat pengaruh cahaya matahari yang dikenalnya sebagai reaksi terang atau fase terang (*light reaction* or *light phase*). Reaksi kedua dimana terbentuk glukosa dalam tumbuhan dari karbondioksida dan ini dikenal sebagai reaksi gelap atau fase gelap (*dark reaction* or *dark phase*).

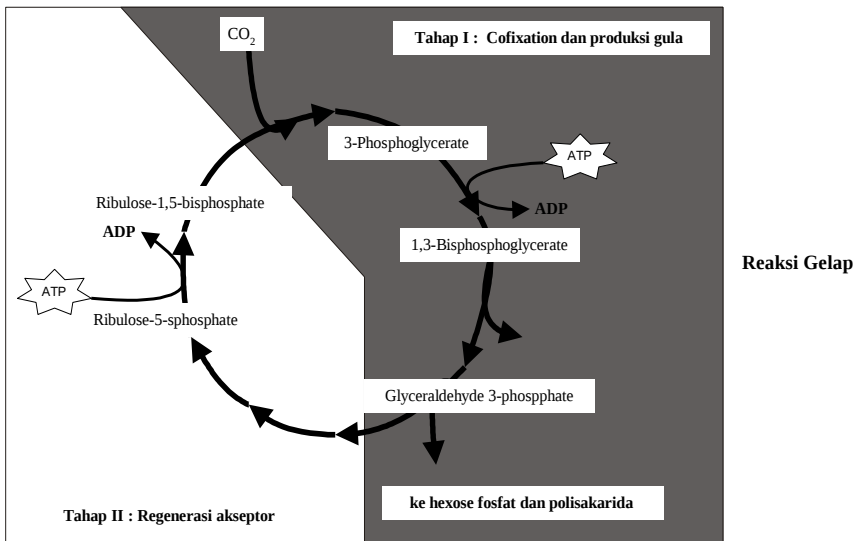
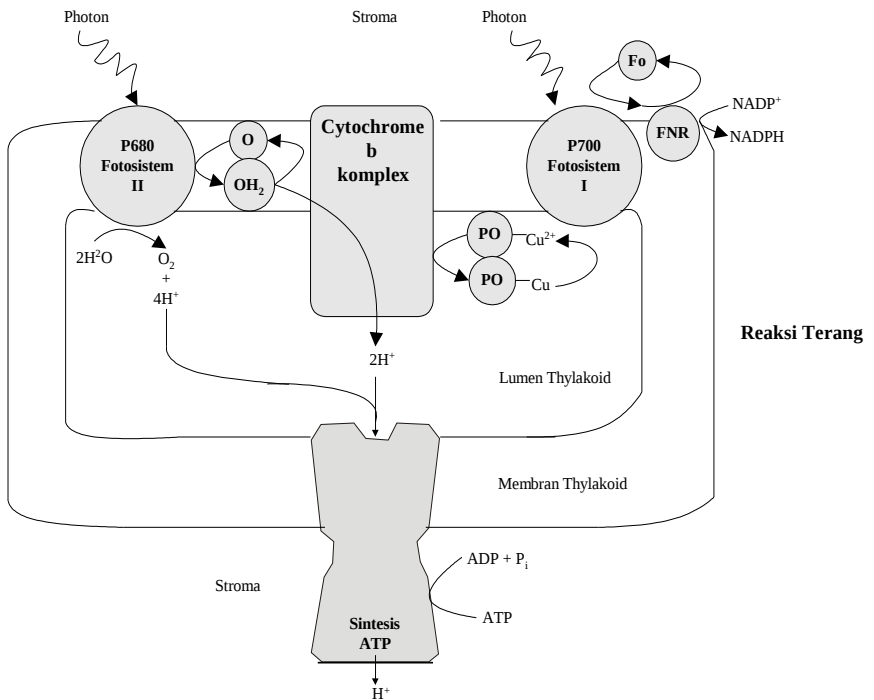
4.4.2 Reaksi Terang Dalam Fotosintesis

Pusat reaksi fotosistem I (PSI) adalah klorofil dengan puncak absorpsi pada gelombang 700 nm (Gambar 4.2) yang diberi nama sebagai P_{700} , terdapat sekitar 110 bagian molekul klorofil-a per P_{700} . Beberapa molekul klorofil-b seperti halnya sekitar 11 molekul protein berbeda untuk pada tempat molekul klorofil pada posisi yang diperlukan dalam membran tilakoid. Jumlah unit PSI sangat ditentukan oleh jumlah molekul P_{700} . Sedangkan pusat reaksi fotosistem II (PSII) adalah molekul klorofil dengan puncak absorpsi pada 680 nm, diberi nama sebagai P_{680} . P_{680} terdapat sekitar 30 lebih molekul klorofil-a dibanding klorofil-b, beberapa molekul klorofil pada tempat yang diperlukan dalam membran tilakoid. Bagian terbesar klorofil berlokasi di light-harvesting complex (LHC). Molekul klorofil berupa antena sebagai perangkap cahaya dan meneruskannya ke salah satu pusat reaksi fotosistem. Pusat reaksi merupakan tempat yang strategis untuk transpor elektron sepanjang rantai transpor-elektron.

Pigment penyerap cahaya memungkinkan terjadinya fotosintesis. Pada umumnya pigment biologi mengandung sistem penting yang menghubungkan antara ikatan ganda antara atom karbon. Resonan elektron tidak terbungkus rantai karbon dapat

menyerap foton, selanjutnya berganti menjadi energi baru, setelah melewati dan memperoleh energi pada reaksi pengaturan enzim. Klorofil a merupakan pigmen kunci pada semua organisme fotosintetis, kecuali *Prochlorococcus* dimana sama dengan divinil-klorofil. Fungsi klorofil a termasuk sebagai dasar protein besar pada cahaya dengan rantai porphyrin dengan atom magnesium yang terikat di pusat ligands. Ekor cincin, sejajar dengan rantai karbon yang disebut phytol, dimana merupakan pasangan protein dalam sistem (Miller, 2004).

Klorofil-a dihubungkan dengan ikatan pigmen protein lainnya (karatenoid, xanthophylls dan beberapa klorofil lainnya) dalam salah satu dari dua tipe "fotosistem" yaitu fotosistem I, atau P_{700} bagi absorpsi dengan panjang gelombang maksimum, dan fotosistem II, atau P_{680} . P_{680} khusus menyerap energi (Gambar 4.2) untuk mengambil elektron dari air, melepaskan proton ($4H^+$) dengan aktif diangkut ke lumen tilakoid dan oksigen dilepaskan ke luar tilakoid. Gerak elektron dalam bagian yang kompleks di transfer ke P_{700} . Energi cahaya diserap disini, peningkatan level energi elektron, kemudian mereduksi $NADP^+$ (nicotinamide adenine dinucleotide phosphate) ke NADPH. Elektron yang stabil, difusi molekul kemampuan reduksi (ketersediaan energi untuk biosintesis) ke dalam sitoplasma, mendorong proton ke dalam tilakoid menghasilkan energi (pH di atas 3.5). Hanya satu enzim yang kompleks, dimana digunakan energi untuk membentuk adenosine diphosphate (ADP) dengan menambahkan ion fosfat ATP baru. Prinsip ATP difusi molekul energi dalam sel. Selama dengan NADPH digunakan untuk mengarahkan biosintesis.

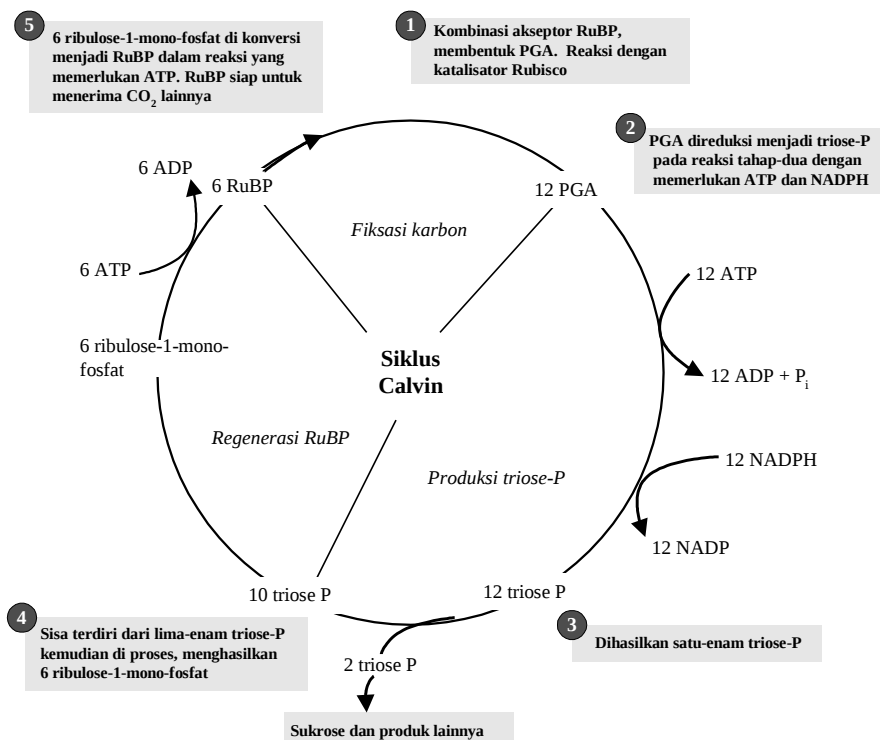


Gambar 4.2. Siklus biokimia dalam proses fotosintesis
(sumber : Mathews et al., 2000)

4.4.3 Reaksi Gelap Dalam Fotosintesis

Bagian yang penting terutama berkaitan dengan proses fotosintesis dalam perubahan karbondioksida menjadi karbohidrat, melalui beberapa tingkat reaksi dan sistem tertentu. Sistem yang dimaksudkan dua sistem, yaitu sistem seperti disajikan pada Gambar 4.2 dan siklus senyawa-senyawa yang beratom tiga carbon atau yang lebih dikenal dengan "Siklus Calvin" (Gambar 4.3). Secara biokimia peristiwa tersebut atau disebut juga proses fotosintesis merupakan suatu reaksi gelap sebagai lanjutan dari bermacam-macam liku-liku reaksi terang. Konsekuensinya mengakibatkan pengaruh sinar matahari sebagai sumber energi untuk dapat berlangsungnya fotosintesis. Pada reaksi terang (seperti yang telah diuraikan pada bagian 4.3.2) kehadiran cahaya adalah mutlak dan dapat dihimpun energi secara kumulatif dalam bentuk ATP dan NADPH. Pada reaksi gelap tidak diperlukan cahaya lagi. Reaksi-reaksi biokimia dapat berjalan lancar. Energi sudah tersedia cukup dan dengan bantuan beberapa enzim pembentukan karbohidrat dapat terlaksana.

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat diuraikan bahwa sisa dari terjadinya proses fotosintesis dalam reaksi gelap juga disebut proses terjadinya tanpa cahaya untuk persediaan karbonate, ATP, dan NADPH. Gula, lipid dan protein semua diproduksi dalam reaksi gelap dalam "stroma" lapisan-lapisan tilakoid. ATP phosphorylates a 5-carbon sugar (gula), ribulose-5-phosphate (Ru5P) menjadi ribulose-bisphosphate (RuBP). Selanjutnya RuBP membawa energi untuk mereduksi dan menambahkan atom carbon dari CO_2 dengan kehadiran enzim kunci yang dinamakan ribulose-bisphosphate-decarboxylase (rubisco). Menghasilkan 6-carbon gula dipisahkan menjadi dua 3-carbon gula keduanya mendaur ulang menjadi Ru5P dan selanjutnya disampaikan ke semua bagian biosintetik sel. Bagian ini, urutan reaksi enzim, menerapkan mengurangi NADPH kuat menjadi atau menambahkan kompleksitas menjadi molekul dan menyimpan energi yang berlebihan. Beberapa oksigen bebas dari P_{680} daur ulang di dalam sel untuk respirasi, itu adalah oksidasi fotosintetis, sedang sisa dilepaskan dari sel.



Gambar 4.3. Siklus Calvin yang memperlihatkan reduksi karbon dalam fotosintesis (sumber: Lambers et al., 1998)

Ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP) dan CO_2 merupakan enzim penting dalam reduksi karbon atau siklus Calvin (Gambar 4.3); ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase atau oksigenase (Rubisco). Produk pertama karbosisasi RuBP oleh Rubisco adalah asam phosphoglyceric (PGA), merupakan senyawa dengan tiga atom karbon. PGA diberi nama dengan sebutan C_3 fotosintesis. Pemanfaatan ATP dan NADPH dalam reaksi cahaya dimana PGA direduksi menjadi triose-phosfat (triose-P), dan beberapa dikeluarkan melalui sitosol dalam pertukaran fosfat inorganik (P_i). Lambers et al., (1998) menjelaskan siklus Calvin pada pembentukan karbohidrat atau reduksi karbon dalam reaksi gelap yang diuraikan sebagai berikut :

Sitosil Triose-P digunakan untuk produksi sukrosa dan metabolisme lainnya yang dikeluarkan melalui phloem atau

digunakan oleh daun (pada tumbuhan tingkat tinggi). Beberapa sisa triose-P dalam kloroplas digunakan untuk regenerasi RuBP melalui suatu rangkaian reaksi bagian siklus Calvin dimana ATP dan NADPH digunakan (Gambar 4.3). Beberapa sisa triose-P dalam kloroplas digunakan untuk menghasilkan zat dimana menjadi tempat terdapatnya kloroplas. Zat dihidrolisis pada waktu malam dan produk reaksinya berupa triose-P, yang diekspor ke sitosol. Siklus reduksi carbon dalam fotosintesis controlnya bervariasi dan faktor fungsi sebagai stabilisator mekanisme di bawah perubahan kondisi lingkungan.

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa tahapan utama dalam siklus Calvin adalah mencakup fiksasi karbon, produksi triose-P, dan regenerasi RuBP. Komponen-komponen dari masing-masing tahapan tersebut sebagai berikut:

1. Kombinasi CO_2 dengan substratnya, ribulose-1,5-bisphosphate (RuBP), katalis oleh ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase (Rubisco), produksi phosphoglyceric acid (PGA).
2. PGA direduksi oleh triose-phosphate (triose-P), dalam reaksi dua tahap, yaitu reaksi dimana ATP yang diperlukan dikonversi PGA oleh 1,3-bisphosphoglycerate, katalis oleh phosphoglycerate kinase.
3. Triose-P keluar dari sitosol, berubah menjadi P_i dan sisanya digunakan untuk regenerasi ribulose-1-monophosphate.
4. Ribulose-1-monophosphate menjadi phosphorylated, katalis oleh ribulose-5-phosphate kinase, produksi RuBP.

DAFTAR PUSTAKA

- Alianto, A., Henri, H., & Suhaemi, S. (2018). Kelimpahan dan kelompok fitoplankton di perairan luar Teluk Wondama, Provinsi Papua Barat. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 10(3), 683-697.
- Alianto, A. E., & Damar, A. (2008). Produktivitas primer fitoplankton dan keterkaitannya dengan unsur hara dan cahaya di perairan Teluk Banten. *Jurnal Ilmu-ilmu Perairan dan Perikanan Indonesia*, 15(1), 21-26.
- Dawson, E. Y. 1966. *Marine Botany*. Holt, Rinehart and Winston, Inc.
- Lambers, H., F. Stuart Chapin III, and Thijs L. Pons. 1998. *Plant Physiological Ecology*. Springer-Verlag New York, Inc.
- Mathewas, C.K., van Holde, K.E & Ahern, K.G. (2000). *Biochemistry*. 3rd edn. The Benjamin-Cummings Publishing Co, Redwood City, CA.
- Miller, C.B. *Biological Oceanography*. Blacwell Publishing, UK.
- Qothrunnada, K. 2021. Pengertian Fotosintesis dan Prosesnya Pada Tumbuhan. Diundu pada tanggal 29 November 2024 pada link <https://www.detik.com/edu/detikpedia/d-5750187/pengertian-fotosintesis-dan-prosesnya-pada-tumbuhan>
- Rahma, R. 2024. Mengetahui Proses Fotosintesis pada Tumbuhan Serta Faktor yang Mempengaruhinya. Diundu pada tanggal 29 November 2024 pada link <https://www.gramedia.com/literasi/proses-fotosintesis-pada-tumbuhan/>
- Yentsch, C.S., 1994. Why the Measurement of Fluorescence Important to the Study of Biological Oceanography?. In: Richard W. Spinger, Kendall L. Carder, Mary Jane Perry (ed.) *Ocean Optics*. Oxford Univesity Press, NY.

BAB 5

RESPIRASI

Oleh Hendri Satria Kamal Uyun

5.1 Respirasi

Respirasi termasuk dalam proses katabolisme, yaitu reaksi yang memecah molekul kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana. Makhluk hidup secara terus-menerus melakukan respirasi untuk menyerap oksigen (O₂) dan melepaskan karbon dioksida (CO₂) dalam jumlah yang seimbang. Proses respirasi secara keseluruhan merupakan reaksi oksidasi-reduksi, di mana senyawa organik dioksidasi menjadi CO₂, sedangkan O₂ yang diserap direduksi menjadi air (H₂O).

Substrat respirasi dapat berupa pati, sukrosa, fruktan, karbohidrat lainnya, lemak, asam organik, maupun protein. Dalam kebanyakan kasus, respirasi menggunakan glukosa sebagai substrat, dan reaksi umumnya dapat dituliskan sebagai berikut:



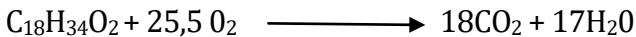
Gambar 5.1. Reaksi Respirasi dengan substrat glukosa.

Sama seperti Fotosintesis respirasi merupakan reaksi yang kompleks. Yang masing masing di katalis oleh enzim yang berbeda-beda. Karena respirasi merupakan katabolisme. Sehingga pemecahan molekul ini bertujuan untuk menghasilkan ATP. Sejalan dengan itu kerangka karbon hasil respirasi digunakan untuk menghasilkan produk essensial (Metabolit Primer) seperti asam amino, Protein, Nukleotida.

Kerangka karbon hasil respirasi bisa digunakan untuk Prekursor (Bahan awal) Untuk pembentukan metabolit sekunder seperti Flavonoid, Alkaloid, Steroid, Terpenoid dan lain-lain.

5.1.1 Kuosien Respirasi (*Respiratory quotient*)

Kuosien Respirasi adalah perbandingan CO_2 dan O_2 . Jika substrat yang digunakan merupakan turunan karbohidrat seperti Fruktosa, sukrosa, pati dan glukosa maka Kuosien respirasi atau yang disingkat dengan RQ adalah 1. (Lihat Gambar 5.1). Akan tetapi berbeda halnya dengan substrat yang digunakan bukan pati, maka nilai RQ yang dihasilkan menjadi lebih rendah. Sebagai contoh adalah reaksi oksidasi asam lemak yaitu asam oleat.



Nilai RQ adalah $18/25,5 = 0,71$.

Secara umum, nilai RQ (*Respiratory Quotient*) dapat digunakan sebagai indikator proporsi karbohidrat yang digunakan sebagai substrat dalam respirasi. Semakin mendekati nilai $\text{RQ} = 1$, semakin besar proporsi karbohidrat yang menjadi substrat respirasi.

5.2 Pembentukan Gula heksosa

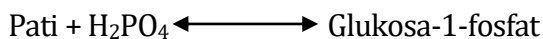
Penyimpanan dan degradasi pati. Pati yang disimpan dalam bentuk butiran yang tidak larut air merupakan turunan senyawa karbohidrat yang disimpan dalam jaringan atau organ tumbuhan sebagai cadangan makanan.

Pati yang terakumulasi terlebih dahulu akan mengalami pemecahan (degradasi) di picu oleh tiga enzim utama yaitu alfa amilase, beta amilase fosforilase dan beberapa enzim lainnya yang memiliki peran untuk degradasi pati. Diantara ketiga enzim utama ini, hanya alfa amilase yang secara langsung mendegradasi pati dengan memutus ikatan 1,4 pada rantai amilosa atau amilopektin sehingga menghasilkan 10 unit glukosa yang disebut dekstrin. Penguraian dekstrin akan menghasilkan alfa maltosa yang mengandung dua unit glukosa. Enzim alfa amilase tidak dapat memutus ikatan 1,6 pada percabangan molekul amilopektin, sehingga penguraian amilopektin akan berhenti setelah terbentuk dekstrin dengan cabang pendek. Enzim alfa amilase diaktifasi oleh Ca^{+2} . Sedangkan enzim beta amilase dan fosforilase berperan mengurai dekstrin.

Enzim alfa-amilase dan beta-amilase bekerja dengan menggunakan satu molekul air untuk memutus setiap ikatan pada molekul substrat. Oleh karena itu, kedua enzim ini digolongkan sebagai enzim hidrolase. Reaksi yang dikatalisis oleh enzim ini bersifat irreversibel, sehingga tidak memungkinkan sintesis molekul pati menggunakan enzim amilase.

Enzim amilase ditemukan di hampir semua jaringan tumbuhan, namun aktivitasnya paling tinggi pada biji yang sedang berkecambah, karena kandungan pati yang melimpah pada tahap ini.

Pada bagian daun enzim alfa amilase lebih banyak berperan dalam menghidrolisis dibandingkan enzim beta amilase. Alfa amilase terdapat dalam kloroplas dan terikat pada butiran pati yang akan diurai dan dapat berfungsi pada siang hari maupun malam hari, karena pada siang hari walaupun terjadi hidrolisis pati tetap terakumulasi, karena pada siang hari jumlah pati yang disintesis lebih banyak dibandingkan yang terurai. Hal ini disebabkan karena siang hari terjadi proses fotosintesis dan juga Alfa amilase mempunyai pH optimum 5.0 oleh sebab itu pada siang hari enzim ini menghidrolisis pati lebih lambat karena pH stroma kloroplas mendekati 8.0, sedangkan pada malam hari pH turun mendekati 7.0. Enzim fosforilase menguraikan pati tidak dengan menggunakan air seperti halnya enzim amilase, tetapi dengan menambahkan fosfat pada produknya sehingga digolongkan enzim fosforolitik dan reaksi yang dipengaruhi dapat bersifat bolak-balik.



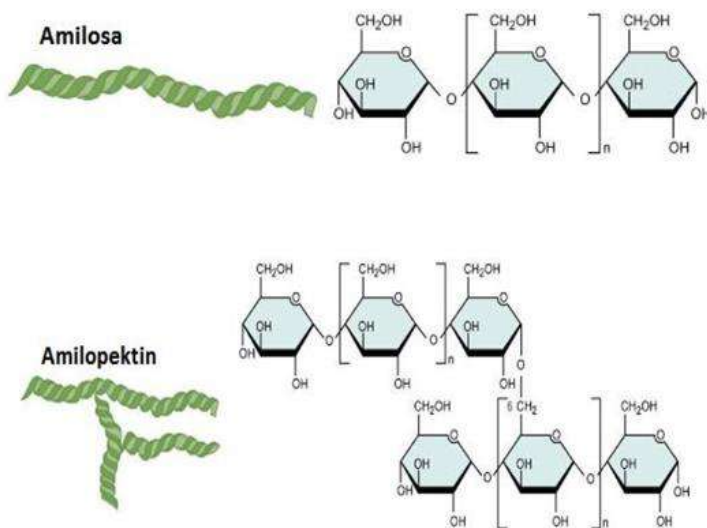
Amilopektin tidak dapat dirubah secara keseluruhan oleh enzim fosforilase, dimana hasil perombakan oleh enzim ini akan menyisakan beberapa molekul glukosa yang terikat oleh enzim ikatan 1,6 dan juga menyisakan dekstrin.

Ikatan 1,6 pada cabang amilopektin akan dihidrolisis oleh enzim pullunase dan isoamilase. Kedua enzim ini dapat mengurai atau menghidrolisis amilopektin secara sempurna dan tidak ada dekstrin yang tersisa, untuk menghasilkan glukosa, maltosa atau glukosa-1-fosfat.

Maltosa jarang terakumulasi karena senyawa ini akan terhidrolisis oleh enzim alfa amilase atau lebih cepat lagi dihidrolisis oleh enzim maltase menghasilkan 2 molekul alfa-D- glukosa yang selanjutnya dapat membentuk polisakarida lainnya atau diurai lebih lanjut dalam proses respirasi.

Fruktan atau Fruktosa dihidrolisis oleh enzim beta fruktofuranosidase yang berperan memutus ikatan beta 2,1 atau 2,6. Enzim ini dapat melepas satu per unit fruktosa dan hanya menyisakan satu unit fruktosa yang terikat pada glukosa di ujung fruktan. Jadi hidrolisis fruktan akan menghasilkan beberapa molekul fruktosa dan satu molekul sukrosa.

Sukrosa hasil penguraian fruktan atau sukrosa yang dibawa dari organ melalui floem akan dihidrolisis lebih lanjut oleh enzim invetase untuk menghasilkan glukosa dan fruktosa. Jadi fruktosa dan glukosa selanjutnya akan menjadi substrat dalam reaksi glikolisis.



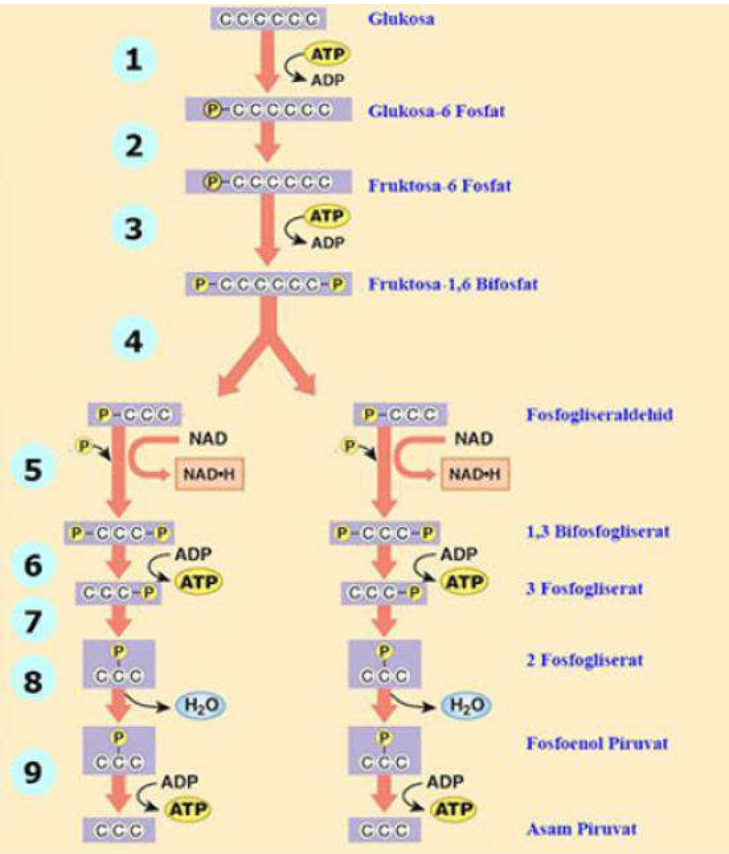
Gambar 5.2. Amilosa dan Amilopektin

5.3 Glikolisis

Proses reaksi yang mengubah glukosa, glukosa-1-fosfat, dan fruktosa menjadi asam piruvat berlangsung di sitosol dan dikenal sebagai glikolisis. Secara harfiah, glikolisis berarti pemecahan gula.

Awalnya, istilah ini merujuk pada penguraian gula untuk menghasilkan etanol dalam kondisi minim oksigen. Namun, dalam kondisi cukup oksigen, hasil akhirnya berupa asam piruvat. Molekul gula yang terurai dalam proses ini umumnya adalah heksosa (gula dengan enam atom karbon), seperti glukosa. Beberapa tahap dalam reaksi glikolisis juga dapat terjadi di dalam kloroplas atau plastida. Glikolisis merupakan tahap awal proses respirasi glikolisis kemudian diikuti oleh reaksi-reaksi pada Dekaboksikasi oksidatif, siklus Krebs dan selanjutnya transfer elektron yang berlangsung pada mitokondria.

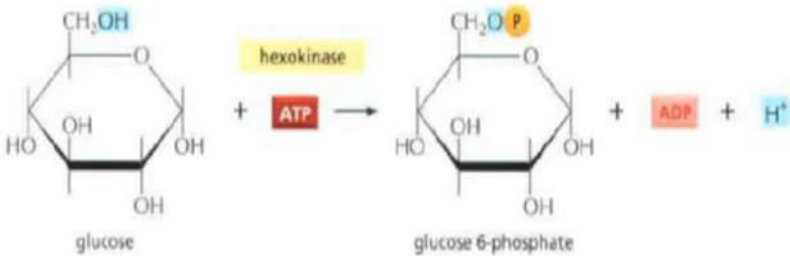
Reaksi glikolisis secara lengkap dapat pada gambar berikut :



Gambar 5.3. Reaksi Glikolisis

1. Fosforilasi Glukosa

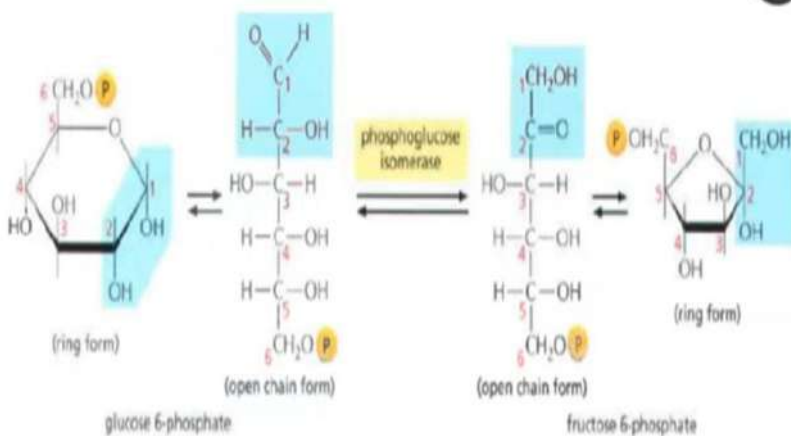
Fosforilasi merupakan proses penambahan gugus fosfat yang dikatalisis oleh enzim heksokinase. Enzim ini memfasilitasi transfer gugus fosfat dari molekul ATP (adenosin trifosfat) ke glukosa, menghasilkan senyawa glukosa-6-fosfat. Selama reaksi ini, ATP, yang berperan sebagai sumber energi, diubah menjadi ADP (adenosin difosfat) setelah kehilangan satu gugus fosfat.



Gambar 5.4. Reaksi Fosforilasi Glukosa pada Reaksi Glikolisis

2. Isomerasi

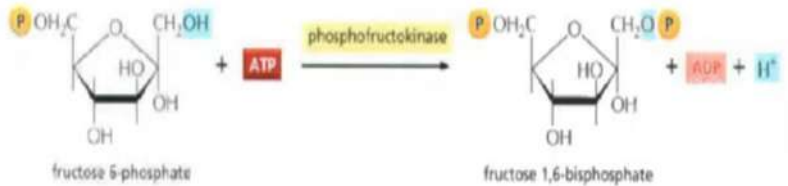
Reaksi ini dikatalisis oleh enzim fosfoglucoisomerase, yang mengubah glukosa-6-fosfat menjadi isomer fruktosa-6-fosfat. Isomer merupakan molekul dengan rumus kimia identik tetapi memiliki susunan struktur yang berbeda.



Gambar 5.5. Reaksi Isomerasi Glukosa pada Reaksi Glikolisis

3. Fosforilasi

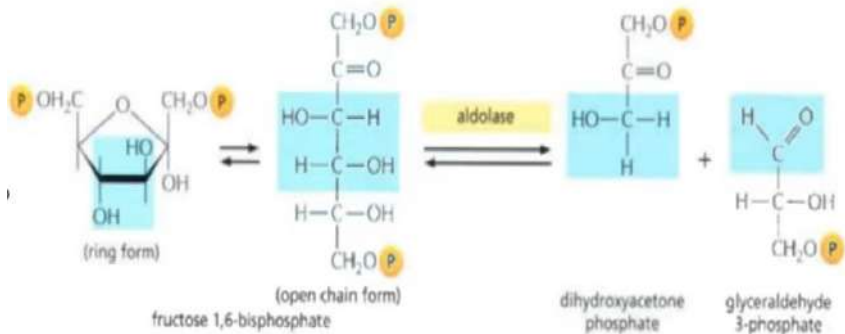
Pada Reaksi ini melibatkan enzim fosfofruktokinase sebagai katalis. Enzim ini memindahkan satu gugus fosfat dari ATP dan menambahkannya ke molekul fruktosa-6-fosfat, menghasilkan fruktosa-1,6-bifosfat sebagai produk akhir.



Gambar 5.6. Reaksi Fosforilasi Glukosa pada Glikolisis

4. Lisis

Reaksi ini dikatalisis oleh enzim aldolase, yang memecah fruktosa-1,6-bifosfat menjadi dua senyawa, yaitu gliseraldehida-3-fosfat (G3P) dan dihidroksiaseton fosfat (DHAP).

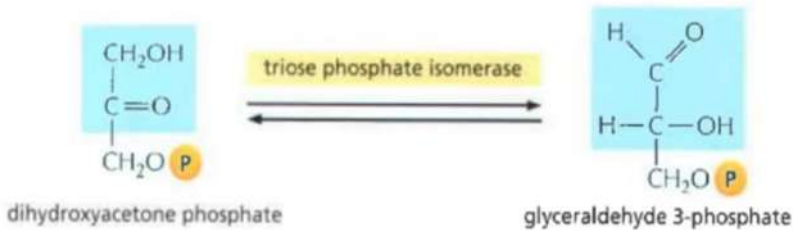


Gambar 5.7. Reaksi Lisis Glukosa pada Glikolisis

5. Isomerasi

Pada Proses reaksi ini dikatalisis oleh enzim isomerase, yang mengubah dihidroksiaseton fosfat menjadi gliseraldehida-3-fosfat, serta memungkinkan reaksi baliknya. Secara

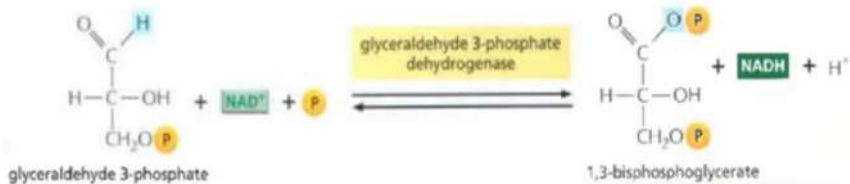
keseluruhan, langkah keempat dan kelima dalam glikolisis menghasilkan dua molekul gliseraldehida-3-fosfat.



Gambar 5.8. Reaksi Isomerasi Glukosa pada Glikolisis

6. Oksidasi dan Fosforilasi

Dikatalis oleh enzim gliseraldehid triose dehidrogenase melibatkan dua reaksi penting yaitu Oksidasi dan fosforilasi. Reaksi oksidasi dimulai dengan enzim gliseraldehid triose dehidrogenase mengoksidasi 3 fosfat yang melepaskan H^+ , sehingga H^+ akan berikatan dengan NAD^+ sehingga akan terbentuk NADH. Setelah H^+ dilepas maka oksigen bergabung ke Gliseraldehid 3 fosfat. Kemudian gugus dari sitosol akan berikatan dengan atom karbon 1 dari gliseraldehid 3 fosfat sehingga akan terbentuk 1,3 bifosfoglisarat.

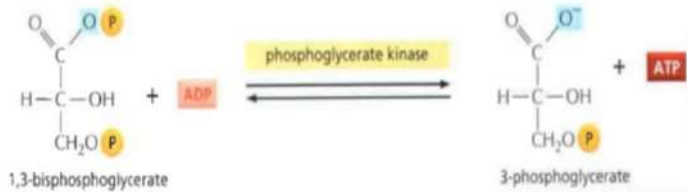


Gambar 5.9. Reaksi Oksidasi dan Fosforilasi Glukosa pada Glikolisis

7. Defosrilasi

Dikatalis oleh enzim fosfoglisero kinase. Enzim fosfoglisero kinase akan melepas satu gugus fosfat yang terikat pada atom

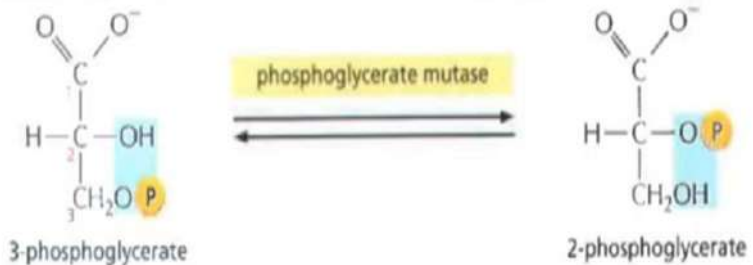
karbon 1 pada 1,3 Bifosfogliserat sehingga terbentuk 3 Fosfogliserat. Gugus Fosfat yang dilepaskan akan di transfer ke ADP akan terbentuk ATP.



Gambar 5.10. Reaksi Defosrilasi Glukosa pada Glikolisis

8. Isomerasi

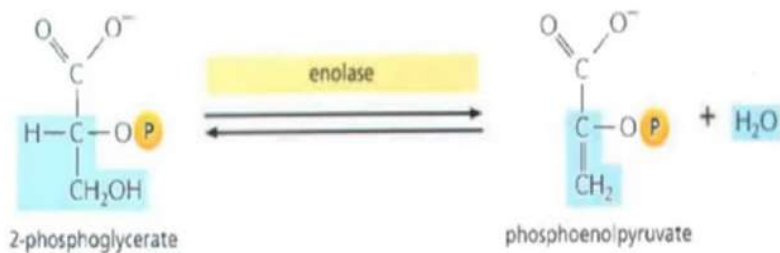
Dikatalis oleh enzim fosfogliserato mutase terjadi pergeseran fosfat karbon 3 ke karbon 2 sehingga 3 fosfogliserat menjadi 2 fosfogliserat.



Gambar 5.11. Reaksi Isomerasi Glukosa pada Glikolisis

9. Dehidrasi

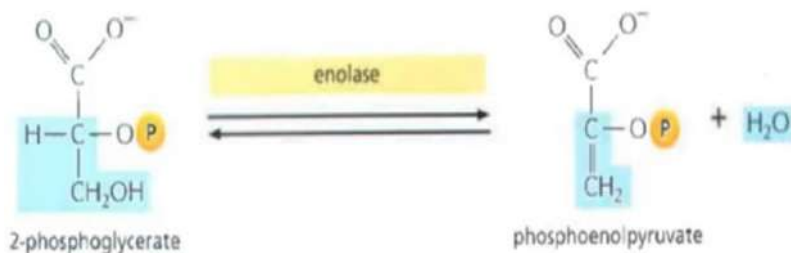
Dikatalis oleh enzim enolase. 2 Fosfogliserat akan melepaskan molekul air dan merubah menjadi Fosfoenol piruvat (PEP).



Gambar 5.12. Reaksi Dehidrasi Glukosa pada Glikolisis

10. Defosforilasi

Dikatalis oleh enzim piruvat kinase. Gugus fosfat dari Fosfoenol piruvat akan dilepas ADP sehingga akan terbentuk ATP.

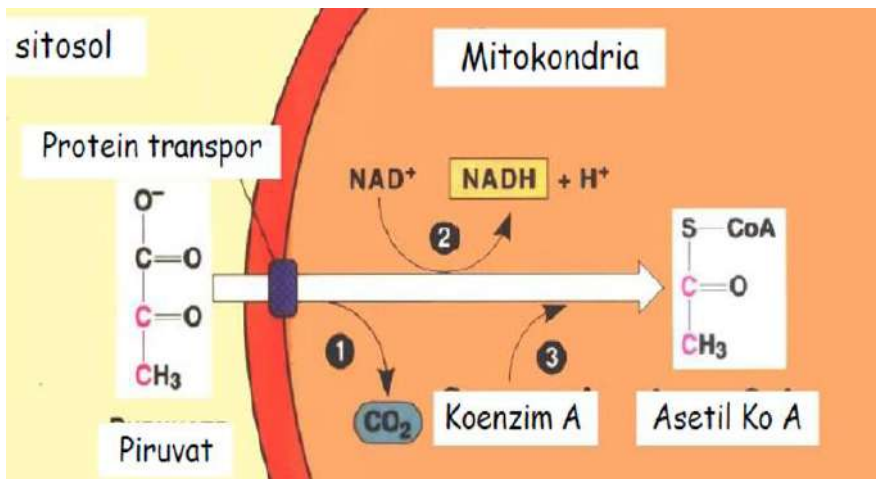


Gambar 5.13. Defosforilasi Isomerasi Glukosa pada Glikolisis
Reaksi akhir Glikolisis adalah 2 molekul NADH, 2 molekul Asam Piruvat dan 2 molekul ATP.

5.4 Dekarboksilasi Oksidatif

Proses Perubahan asam Piruvat menjadi asetil CoA. CO_2 dan NADH juga dihasilkan pada proses reaksi Dekarboksilasi Oksidatif. Terjadi Matrik mitokondria. Asetil CoA hasil dekarboksilasi oksidatif akan masuk siklus Krebs. Proses dekarboksilasi oksidatif :Molekul piruvat yang dihasilkan dari reaksi glikosis memiliki atom karbon 3. Molekul asam piruvat akan masuk ke mitokondria (matriks mitokondria) melalui protein transpor.Molekul asam piruvat akan melepaskan 1 atom karbon sehingga membentuk Asetil yang mempunyai 2 atom karbon. Satu atom karbon yang dilepaskan akan ditangkap oleh oksigen sehingga membentuk karbondioksida (CO_2).

Ketika terbentuk CO_2 ada ikatan yang terputus antara atom karbon no 1 dan atom karbon no 2, sehingga ada elektron yang dilepaskan. Elektron tersebut akan ditangkap oleh NAD^+ sehingga terbentuk NADH . Asetil akan terikat pada CoA sehingga terbentuk Asetil CoA. Asetil CoA akan digunakan untuk tahap Siklus Krebs. Apabila ada 2 molekul piruvat yang masuk ke jalur dekarboksilasi oksidatif maka akan dihasilkan 2 molekul NADH , 2 molekul CO_2 dan 2 molekul asetil CoA.



Gambar 5.14. Dekarboksilasi Oksidatif

Hasil akhir pada Dekarboksilasi Oksidatif adalah 2 Molekul CO_2 , 2 molekul NADH dan 2 Molekul Asetil CoA.

5.5 Siklus Krebs

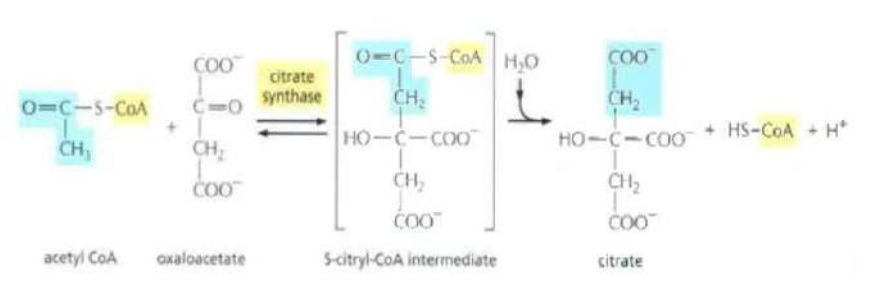
Siklus Krebs disebut juga siklus asam sitrat, karena asam sitrat merupakan senyawa yang penting pada reaksi ini. Siklus ini juga bisa disebut siklus asam trikarboksilat.

Asetil CoA Hasil dari Dekarboksilasi Oksidatif berikatan dengan asam oksaloasetat membentuk senyawa asam sitrat dengan bantuan enzim sitrat sintase.

Tahap 1

NADH dan FADH_2 yang terbentuk selama proses glikolisis maupun siklus Krebs akan dioksidasi untuk menghasilkan ATP.

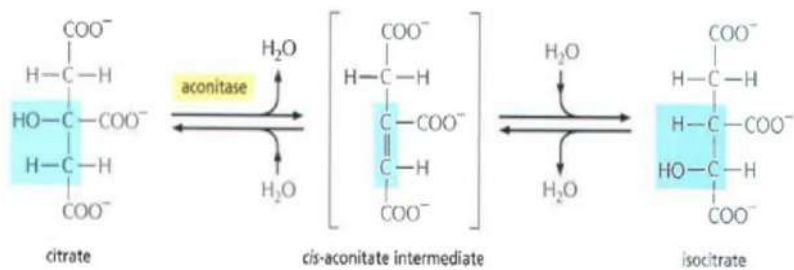
Meskipun reaksi oksidasi ini melibatkan oksigen (O₂) dan menghasilkan air (H₂O), NADH dan FADH₂ tidak bereaksi langsung dengan oksigen dalam proses tersebut.



Gambar 5.15. Reaksi Tahap 1 pada Siklus Krebs

Tahap 2

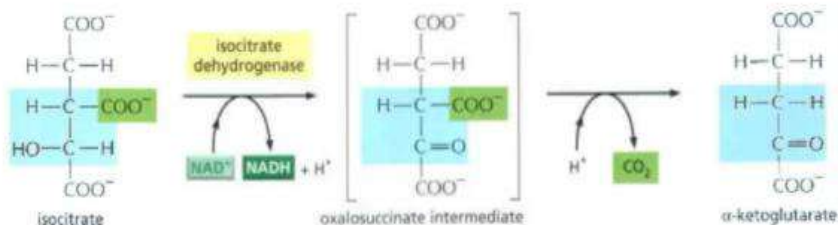
Asam sitrat dengan enzim Akonitase akan membentuk senyawa iso sitrat. Pada Reaksi terjadi 2 peristiwa Dehidrasi (Pelepasan Molekul air) dan Dehidrasi (Penambahan Molekul air).



Gambar 5.16. Reaksi Tahap 2 pada Siklus Krebs

Tahap 3

Asam isositrat yang memiliki karbon 6 dengan enzim Isositrat dehidrogenase akan dirubah menjadi a-ketoglutarat yang memiliki karbon 5. Pada reaksi ini terjadi pelepasan ikatan sehingga ada elektron yang dilepaskan. Elektron yang dilepaskan akan diterima oleh NAD⁺ sehingga akan terbentuk NADH dan pada reaksi terjadi proses derkaboksilasi.

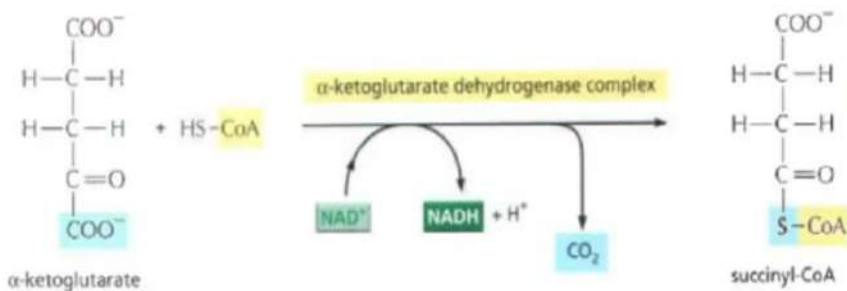


Tahap 3 Isositrat Dehidrogenase

Gambar 5.17. Reaksi Tahap 3 pada Siklus Krebs

Tahap 4

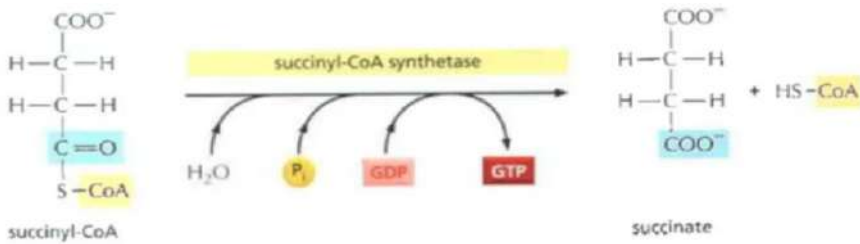
α -ketoglutarat yang memiliki 5 atom karbon akan diubah menjadi Suksinil-CoA yang memiliki 4 atom carbon dengan bantuan α -ketoglutarat dehydrogenase terjadi proses dekarboksilasi 1 atom karbon, atom karbon tersebut lepas membentuk CO_2 Terjadi reduksi NAD^+ sehingga membentuk NADH Suksinil akan berikatan dengan CoA menjadi Suksinil-CoA.



Gambar 5.18. Reaksi Tahap 4 pada Siklus Krebs

Tahap 5

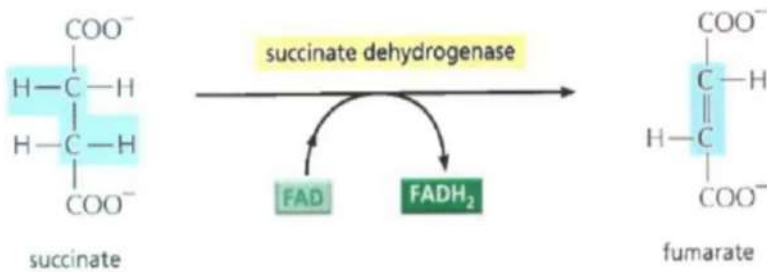
Suksinil-CoA, senyawa dengan empat atom karbon, diubah menjadi asam suksinat dengan bantuan enzim suksinil-CoA sintetase. Proses ini melibatkan fosfat anorganik (Pi), yang memutus ikatan antara suksinil dan CoA, sehingga CoA dilepaskan. Fosfat anorganik tersebut kemudian berikatan dengan GDP untuk membentuk GTP . Selanjutnya, gugus fosfat dari GTP ditransfer ke ADP , menghasilkan ATP .



Gambar 5.19. Reaksi Tahap 5 pada Siklus Krebs

Tahap 6

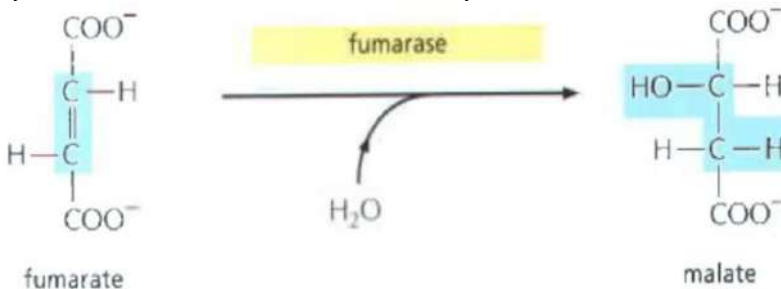
Suksinat diubah menjadi fumarat dengan bantuan enzim suksinat dehidrogenase. Dalam reaksi ini, elektron dilepaskan dan diterima oleh FAD⁺, yang kemudian direduksi menjadi FADH₂.



Gambar 5.20. Reaksi Tahap 6 pada Siklus Krebs

Tahap 7

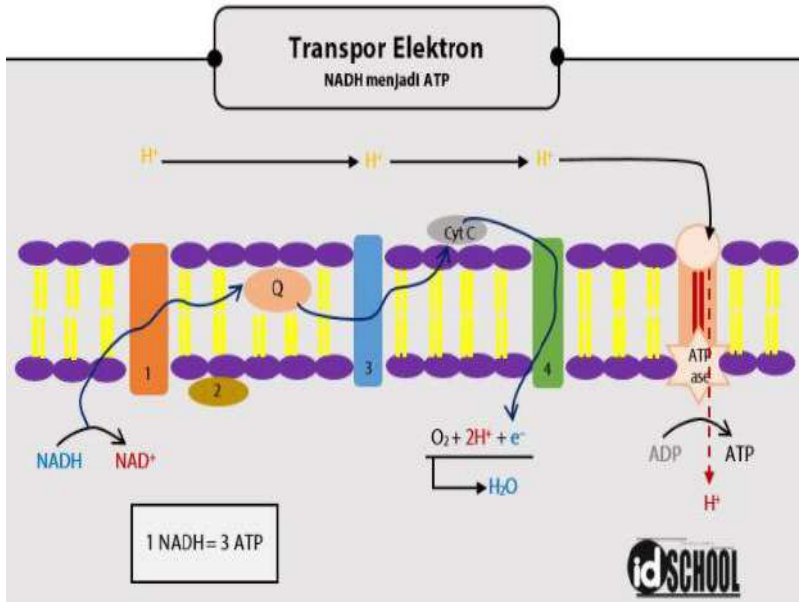
Fumarat dengan bantuan enzim Fumarase akan diubah menjadi Asam malat. Pada reaksi ini terjadi reaksi Hidrasi.



Gambar 5.21. Reaksi Tahap 7 pada Siklus Krebs

5.6 Transpor Elektron

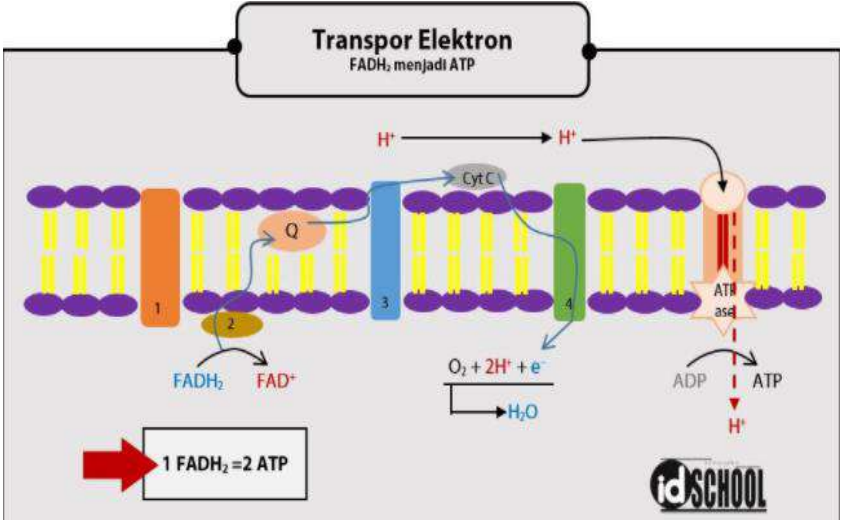
NADH teroksidasi menjadi NAD^+ , yang memungkinkan transfer elektron ke kompleks protein I. Elektron tersebut diteruskan ke koenzim Q dan selanjutnya dipindahkan melalui kompleks protein III menuju sitokrom C. Selama perjalanan elektron melalui kompleks-kompleks protein ini, ion H^+ dipompa ke ruang antarmembran. Di kompleks I, satu ion H^+ dipompa, dan di kompleks III, ion H^+ tambahan dipindahkan. Pada akhirnya, elektron bergabung dengan ion hidrogen dan oksigen untuk membentuk molekul air (H_2O), dengan oksigen berperan sebagai akseptor elektron akhir. Ion H^+ yang terkumpul di ruang antarmembran kemudian kembali ke matriks mitokondria melalui ATP sintase, yang mengubah ADP menjadi ATP dengan memanfaatkan energi dari pergerakan ion H^+ . Setiap tiga ion H^+ yang dipompa selama proses ini menghasilkan satu molekul ATP, yang berarti setiap NADH dapat menghasilkan tiga molekul ATP.



Gambar 5.24. Perubahan NADH menjadi ATP

Pertama, FADH_2 teroksidasi menjadi FAD^+ , dan elektron yang dilepaskan memasuki kompleks protein 2. Elektron tersebut kemudian diteruskan ke koenzim Q, lalu ke sitokrom C. Saat

melewati kompleks protein 3, satu ion H^+ dipompa ke ruang antarmembran. Selanjutnya, elektron dari sitokrom C dibawa menuju kompleks protein 4, di mana ion H^+ tambahan dipompa keluar. Ion H^+ yang terbentuk selama proses ini kembali ke matriks mitokondria melalui ATP sintase (ATPase), yang memanfaatkan gradien proton untuk mengonversi ADP menjadi ATP. Total dua ion H^+ dipompa keluar untuk setiap molekul $FADH_2$, menghasilkan dua molekul ATP. Pada tahap akhir, elektron bereaksi dengan ion H^+ dan ditangkap oleh oksigen (O_2), membentuk molekul air (H_2O). Proses produksi ATP oleh ATP sintase dikenal sebagai kemiosmosis.



Gambar 5.25. Perubahan $FADH_2$ menjadi ATP

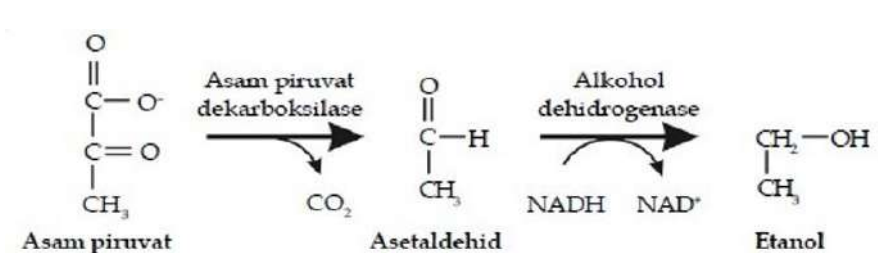
Tabel 5.1. Total ATP yang dihasilkan Pada Respirasi Aerob

Glikolisis	2 ATP		2 ATP
	2 NADH		6 ATP
Dekaboksilasi Oksidatif	2 NADH		6 ATP
Siklus Krebs	6 NADH		18 ATP
	2 FADH ₂		4 ATP
	2 ATP		2 ATP
Jumlah			38 ATP

5.7 Fermentasi

Pada tumbuhan yang akarnya tergenang pada air, akan melakukan proses respirasi anaerob. Respirasi anaerob merupakan respieasi yang tidak memerlukan oksigen sehingga disebut juga dengan proses fermentasi. Fermentasi yang umum terjadi pada tumbuhan adalah fermentasi alkohol. Glukosa akan berubah menjadi piruvat melalui proses glikolisis yang terjadi di sitoplasma. 2 molekul piruvat yang memiliki 3 atom karbon hasil glikolisis akan diubah menjadi 2 molekul Asetildehida yang memiliki 2 atom karbon. Terjadi pelepasan satu atom karbon yang akan membentuk 2 molekul CO_2 . Asetildehida akan mengikat ion H^+ yang berasal dari NADH menjadi NAD^+ dan terbentuk 2 molekul Etanol.

Secara lebih lengkap mengenai reaksi fermentasi berlangsung pada tumbuhan hidup pada jurnal-jurnal yang berhubungan dengan kondisi kekurangan oksigen, baik secara alami contohnya pada tanaman air atau penelitian yang dirancang menggunakan gas nitrogen sebagai pengganti udara normal untuk menjamin kondisi tanpa oksigen. Reaksi fermentasi yang menghasilkan etanol dan CO_2 untuk setiap molekul glukosa yang difermentasi.



Gambar 5.26. Reasi Anaerob

DAFTAR PUSTAKA

- Frank B Salisbury, C.W.R. (1995) *Fisiologi Tumbuhan*. Empat. Bandung: Penerbit ITB.
- Januar Darmawan, J.B. (2010) *Dasar Dasar Ilmu Fisiologi Tumbuhan*. Jakarta: SITC.
- Salisbury, F.B. and cicon w R. (1995) *Plant Physiology*. Third Edit.
- Suharti, N. (2015) *Buku Ajar Botani Farmasi*. Edited by A.H. Pamungkas. padang: ADTUIL.

BAB 6

PROSES PERTUMBUHAN DAN PERKEMBANGAN TUMBUHAN

Oleh Nonci M. Uki

6.1 Pendahuluan

Proses pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan adalah dua aspek fundamental dalam siklus hidup tanaman yang saling terkait dan sangat penting bagi kelangsungan hidup tumbuhan. Pertumbuhan mengacu pada peningkatan ukuran dan massa tumbuhan yang bersifat kuantitatif, sedangkan perkembangan melibatkan perubahan struktural dan fungsional yang bersifat kualitatif. Proses ini dimulai dari tahap awal kehidupan tumbuhan yaitu dari biji atau spora, hingga mencapai kedewasaan yang memungkinkan tumbuhan untuk bereproduksi.

Tumbuhan mengalami dua jenis pertumbuhan: primer dan sekunder. Pertumbuhan primer berlangsung di ujung akar dan batang, tempat sel-sel meristem membelah dan memperpanjang organ tumbuhan. Sementara itu, pertumbuhan sekunder terjadi pada bagian yang lebih tua, seperti batang dan akar, sehingga memungkinkan penebalan jaringan kayu.

Diferensiasi sel menjadi jaringan dan organ kompleks seperti akar, batang, daun, bunga, dan buah merupakan bagian penting dari perkembangan tumbuhan. Proses ini tidak hanya mendukung pertumbuhan fisik, tetapi juga membantu tumbuhan beradaptasi dengan lingkungannya. Dengan memahami proses pertumbuhan dan perkembangan, kita akan lebih memahami bagaimana tumbuhan beradaptasi dan bertahan hidup dalam berbagai lingkungan.

6.2 Pengertian Pertumbuhan dan Perkembangan

Perubahan biologis yang terjadi pada seluruh makhluk hidup, termasuk peningkatan ukuran, volume, tinggi, dan massa yang tidak dapat dihindari yang dikenal sebagai pertumbuhan. Perubahan ini dapat diukur secara kuantitatif dalam satuan panjang dan berat, (Asriani Taridal, 2019)

Menurut(Asriani Taridal, 2019), diferensiasi dan spesialisasi sel proses menuju kedewasaan dikenal sebagai perkembangan. Perkembangan tidak dapat di ukur tetapi dinyatakan secara kuantitatif. Ditinjau dari segi anatomi dan fisiologi, diferensiasi merupakan perubahan yang menyangkut pada spesialisasi fungsi sel. Siklus perkembangan tanaman diawali dengan perkecambahan, dilanjutkan dengan *juvenility*/usia muda, kemudian pendewasaan, pembungaan dan pembuahan. Tumbuhan mengembangkan berbagai bagian, seperti akar, batang, daun, bunga, dan buah, selama perkembangan mereka, serta melakukan tugas khusus, seperti fotosintesis dan reproduksi.

6.3 Perbedaan antara Pertumbuhan dan Perkembangan pada Tumbuhan

Tabel 6.1 menunjukkan perbedaan antara pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Tabel 6.1. Perbedaan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan

Aspek	Pertumbuhan Tumbuhan	Perkembangan Tumbuhan
Pengertian	Memperbesar ukuran fisik tumbuhan	Perubahan bentuk dan fungsi tumbuhan seiring waktu
Fokus Utama	Meningkatkan jumlah dan ukuran sel	Perubahan pada struktur tumbuhan dan fungsinya
Proses	Diutamakan untuk menambah sel baru dan memperpanjang organ tumbuhan yang sudah ada.	Diferensiasi sel, pembentukan organ baru, dan pengembangan fungsi yang lebih kompleks.

Aspek	Pertumbuhan Tumbuhan	Perkembangan Tumbuhan
Hasil	Tumbuhan tumbuh dan menghasilkan lebih banyak sel.	Bentuk dan struktur tumbuhan berubah, dan mereka juga mengembangkan kemampuan baru.
Waktu	Berlangsung selama siklus hidup tumbuhan	Meskipun terjadi sepanjang siklus hidup tumbuhan, ia lebih berkonsentrasi pada fase pertumbuhan awal hingga dewasa.
Pengaruh lingkungan	Dipengaruhi oleh cahaya, air, nutrisi dan suhu	Dipengaruhi oleh hal-hal yang sama seperti pertumbuhan, tetapi juga oleh hormone tumbuhan dan interaksi dengan organisme dalam ekosistem lainnya
Contoh	Misalnya, tumbuhan mengalami pertumbuhan yang lebih besar atau memiliki daun yang lebih besar.	Misalnya, tumbuhan mengalami diferensiasi sel untuk berfungsi sebagai daun atau akar, atau mengembangkan akar yang lebih dalam dan bunga yang lebih kompleks.

Sumber: (Pijar, n.d.)

Tabel 6.2 menunjukkan persamaan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Tabel 6.2. Persamaan antara Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan

Aspek	Persamaan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan
Proses biologis	Kedua proses ini terjadi secara alami dalam siklus hidup tumbuhan.
Ketergantungan pada nutrisi	Pertumbuhan dan perkembangan membutuhkan air, nutrisi, dan energi matahari.
Penting untuk kelangsungan hidup	Untuk menjalani fungsi dasar dan reproduksi, pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan sangat penting.
Terpengaruh oleh lingkungan	cahaya, suhu, dan komposisi tanah dapat memengaruhi keduanya.
Terjadi sepanjang siklus hidup	Dari awal hingga akhir siklus hidup tumbuhan
Berdampak pada bentuk dan fungsi	Baik pertumbuhan maupun perkembangan mempengaruhi pertumbuhan dan fungsi tumbuhan dalam ekosistem.

Sumber: (Pijar, n.d.)

Pertumbuhan dan perkembangan adalah proses yang berbeda dalam tumbuhan, tetapi keduanya sangat penting untuk keberhasilan tumbuhan dalam menjalani siklus hidupnya.

6.4 Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan

Secara umum, ada dua komponen yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman, yaitu

6.4.1 Faktor Internal

Faktor internal yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan termasuk elemen yang berasal dari tubuh tumbuhan itu sendiri. Adapun faktor utama menurut (Nana, 2022)., (Embun Bening Diniari, 2018)., (Maria, 2021) yaitu:

1. Genetik

Genetik adalah bahan yang memiliki karakteristik yang diturunkan dari induk ke generasi berikutnya. Karakteristik fisik tumbuhan seperti bentuk, warna, dan rasa buah dipengaruhi oleh gen. Gen juga mengontrol proses metabolisme, yang berdampak pada laju pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Dalam periodenya, tanaman yang memiliki gen tumbuh yang baik akan tumbuh dan berkembang dengan cepat.

2. Hormon

Hormon tumbuhan, juga disebut fitohormon, adalah zat yang dibuat oleh tumbuhan untuk mengatur berbagai proses fisiologi. Meskipun jumlahnya kecil, hormon benar-benar memengaruhi banyak proses dalam tubuh tumbuhan. Tumbuhan menghasilkan fitohormon, yang memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Beberapa fitohormon yang memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan adalah sebagai berikut:

- a. Auksin yaitu pemanjangan sel dan dominasi apical
- b. Giberelin yaitu mendorong petumbuhan, perkecambahan biji, pembentyan bunga, dominasi lateral dan pembentukan buah tanpa adanya biji (partenokarpi)
- c. Sitokinin yaitu memfasilitasi pembelahan sel dan memperlambat penuaan dan pembentukan organ
- d. Asam absisat (ABA) yaitu pengguguran organ, dormansi biji serta menghambat pertumbuhan tunas

- e. Etilen yaitu hormone dalam benur gas untuk pematangan buah, menginduksi pembungaan dan mempercepat penuaan
- f. Traumalin adalah proses pembentukan jaringan baru setelah luka pada tumbuhan.
- g. Kalin yaitu berperan dalam penginduksian organ

6.4.2 Faktor Eksternal

Faktor eksternal adalah faktor luar yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan.

Adapun faktor utamanya menurut (Nana, 2022), (Embung Bening Diniari, 2018), (Maria, 2021)) yaitu:

1. Cahaya Matahari

Cahaya matahari memengaruhi pertumbuhan. Ini tidak hanya memengaruhi proses pertumbuhan, tetapi juga memengaruhi periode pembungaan. Peristiwa ini dikenal sebagai *fotoperiodisme*.

2. Nutrisi

Tubuh menggunakan nutrisi sebagai bahan baku dan sumber energi. Tanaman akan berkembang berdasarkan kualitas dan kuantitas nutrisi. Nutrisi, yang terdiri dari makronutrien (yang diperlukan dalam jumlah yang banyak) dan mikronutrien (yang diperlukan dalam jumlah yang sedikit), bertanggung jawab untuk membangun tubuh dan sangat penting untuk pertumbuhan yang sehat.

3. Air dan Kelembaban

Air adalah komponen vital untuk semua makhluk hidup, termasuk tumbuhan. Kelembaban udara juga mempengaruhi laju transpirasi yang berdampak pada penyerapan air dan nutrisi. Tanpa cukup air, tumbuhan tidak dapat bertahan hidup atau berkembang dengan baik.

4. Suhu

Suhu sangat memengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman; sebagai contoh, jika padi ditanam pada awal musim kemarau ketika suhu rata-rata tinggi, itu akan dipanen lebih cepat daripada pada musim penghujan ketika suhu rata-rata lebih rendah. Ini karena suhu

memengaruhi berbagai proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman, termasuk fotosintesis, penguapan, penyerapan air, dan pernapasan.

5. Oksigen

Tubuh setiap makhluk hidup membutuhkan oksigen untuk melakukan respirasi aerob. Tumbuhan dapat menghasilkan energi melalui respirasi. Oleh karena itu, ketersediaan oksigen sangat penting selama fase awal pertumbuhan karena biji tidak akan berkecambah tanpanya.

6.5 Tahapan Pertumbuhan dan Perkembangan Tumbuhan

Menurut (Apon, 2020), (Ely Rudyatmi., 2016), dan (Arfan Hamid dan Pratita, 2022), pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan terjadi dalam tiga fase:

6.5.1 Perkecambahan

Perkecambahan biji adalah proses munculnya embrio melalui biji. Proses ini dimulai sejak dorman (periode diam) sampai menjadi bibit yang tumbuh. Mekanisme perkecambahan meliputi beberapa cara yaitu:

1. Imbibisi

Selama proses imbibisi, air masuk ke dalam benih, memulai proses munculnya kecambah dari benih. Karena benih lebih kering dari lingkungannya, air masuk ke dalam benih melalui proses difusi atau osmosis. Selama proses ini, lapisan koloid mengembang dan menarik air, meningkatkan volumenya hingga 200. Kulit biji akan pecah sebagai akibatnya.

2. Pembentukan Enzim

Hormon giberelin akan diaktifkan pada embrio ketika air masuk ke dalam benih atau biji. Selanjutnya, lapisan aleuron menghasilkan enzim amylase, yang berfungsi sebagai endosperma untuk mengubah pati menjadi gula.

3. Pemanjangan Sel Radikula

Pemanjangan sel radikula akan diikuti oleh tumbuh radikula yang lebih terlihat dan tumbuh kulit biji. Setelah itu, kecambah akan mengalami pertumbuhan primer.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi perkembangan embrio (Perkecambahan), yaitu:

1. Faktor dalam

Faktor Dalam terdiri dari:

a. Tingkat Kematangan Benih

Salah satu faktor yang mempengaruhi perkecambahan benih adalah tingkat kematangan. Jika benih dipanen sebelum mencapai tingkat kematangan fisiologis, kemungkinan hidup benih akan berkurang karena benih tidak memiliki cadangan makanan yang cukup untuk metabolisme perkecambahan.

b. Hormon

Hormon berfungsi sebagai stimulant dalam proses metabolisme. Jika jumlah hormone dalam biji tercukupi, dinding sel menjadi lebih elastis, yang memudahkan proses imbibisi dan mempercepat perkecambahan.

c. Ukuran Benih

Ukuran benih memengaruhi proses perkecambahan selain tingkat kematangan benih. Benih atau biji yang lebih besar dianggap memiliki cadangan makanan yang lebih besar daripada benih atau biji yang lebih kecil. Ini memastikan metabolisme perkecambahan berjalan dengan baik.

d. Dormansi

Dormansi adalah keadaan pertumbuhan yang tertunda atau istirahat. Perkecambahan juga dipengaruhi oleh dormansi: benih akan menjadi lebih lambat jika berlangsung lama.

2. Faktor Luar

Adapun faktor eksternal terdiri dari:

a. Air

Air berfungsi sebagai pelunak kulit biji selama proses perkecambahan, melarutkan cadangan makanan, membantu transportasi, dan bekerja dengan hormone yang mengontrol elungasi (pemanjangan) dan

pengembangan sel. Tanpa air, proses ini tidak akan berhasil.

b. Cahaya

Tidak semua tanaman membutuhkan jumlah cahaya yang sama. Benih harus diberikan jumlah cahaya yang tepat untuk memaksimalkan proses perkecambahan. Jika benih atau biji tidak mendapatkan cukup cahaya, kecambah akan berwarna pucat dan lemah, dan hipokotil atau epikotil akan memanjang atau etiolasi, yang merupakan tanda-tanda pematangan yang tidak normal.

c. Temperatur

Tempertaur yang ideal untuk benih adalah antara 800 hingga 950 °F, atau 20,50 °C hingga 350 °C. Metabolisme kecambah akan gagal ketika suhu berada di bawah atau di atas optimal.

d. Oksigen

Semua makhluk hidup membutuhkan oksigen untuk proses respirasi, dan tumbuhan juga membutuhkan oksigen untuk perkecambahan.

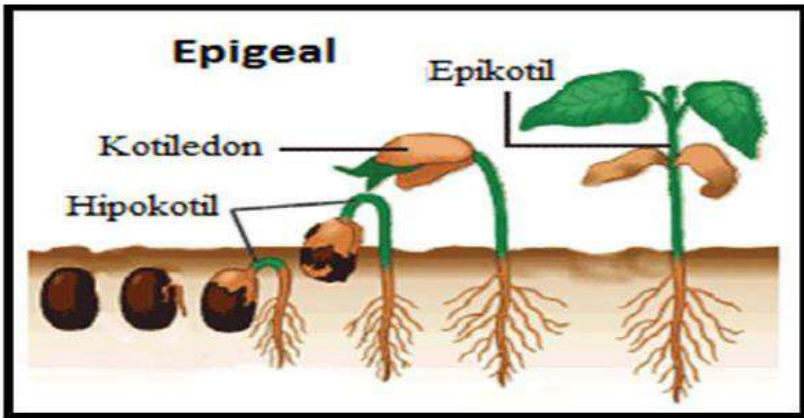
e. Media Tanam

Untuk berkembang biak, media tanam harus gembur, dapat menyimpan air, dan bebas dari organisme penyebab penyakit.

Berdasarkan letak kotiledonnya, perkecambahan dapat dibedakan menjadi dua yaitu:

1. Perkecambahan Epigeal

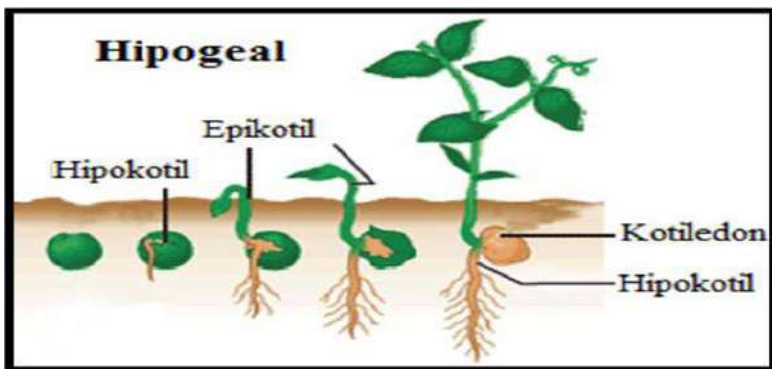
Pada perkecambahan epigeal, kotiledon terangkat ke atas tanah karena pertumbuhan memanjang bagian hipokotil. Kotiledon terbentuk dari keping-keping biji hijau. Hipokotil berbentuk kait dan ujung plumula terletak di antara dua keping biji untuk melindungi ujung plumula dari tanah yang bergeser.



Gambar 6.1. Perkecambahan Epigeal
Sumber: (Apon, 2020)

2. Perkecambahan Hipogeal

Selama perkembangan hipogeal, kotiledon tetap berada di dalam tanah sedangkan plumula keluar dari permukaan tanah karena pertumbuhan epikotil yang memanjang ke arah atas. Akibatnya, kotiledon tetap berada di dalam testa sementara tunas muda dan akar muncul dari dalam biji.



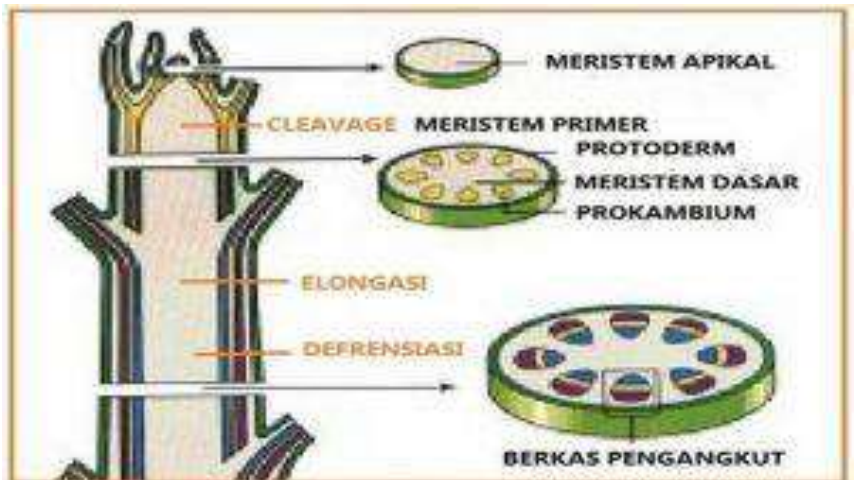
Gambar 6.2. Perkecambahan Hipogeal
Sumber: (Apon, 2020)

6.5.2 Pertumbuhan

Terdapat dua macam pertumbuhan tanaman menurut (Hana, 2022)., (Ahmad Nurhakim dan Pratita Atinirmala, 2022).,(Asriani Taridal, 2019).,(Apon, 2020) & (Ely Rudyatmi., 2016)) yaitu:

1. Pertumbuhan Primer

Pertumbuhan jaringan meristem primer pada ujung akar dan ujung batang tumbuhan, juga dikenal sebagai jaringan meristem apikal atau meristem ujung, yang berfungsi sebagai pusat pembelahan sel, sangat penting untuk pertumbuhan primer karena memungkinkan akar menjulang ke atas untuk mengakses air, mineral, dan sinar matahari dengan lebih baik.



Gambar 6.3. Pertumbuhan Primer

Sumber:(Hana, 2022)

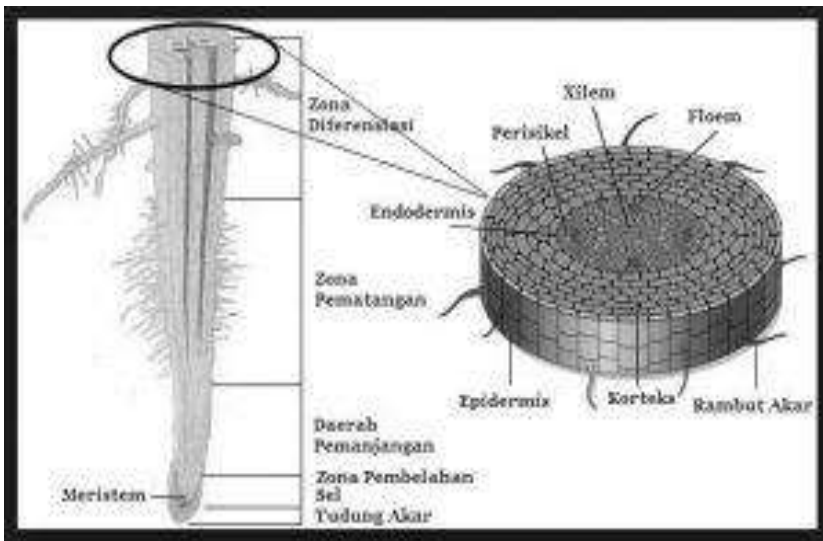
Ujung batang dan ujung akar memiliki tiga daerah pertumbuhan, yaitu:

- Daerah pembelahan terletak di ujung akar, di mana sel meristem mengalami perkembangan dan pertumbuhan struktur akar pertama.
- Daerah pemanjangan adalah area di mana pembesaran dan pemanjangan sel terjadi setelah daerah pembelahan.
- Daerah diferensiasi: area di mana sel-sel terpisah satu sama lain dan memiliki karakteristik tertentu.

Pertumbuhan Primer pada Akar

Sistem perakaran tumbuhan dibentuk oleh akar sederhana yang keluar dari biji. Ada tiga titik pertumbuhan akar, yaitu

- Pembelahan. Meristem berbentuk kotak yang sangat kecil dengan meristem primer dan meristem apikal membelah aktif (meristematik), berfungsi sebagai pusat pembelahan sel. Sel ini terletak di belakang tudung akar di bagian ujung.
- Meristem apikal berfungsi sebagai pusat pembelahan sel.
- Pemanjangan. sel-sel memanjang dan berkembangbiak, dan pembentangan sel-sel di area ini akan memungkinkan akar bergerak lebih jauh dari tanah.
- Diferensiasi. memiliki struktur dan fungsi yang berbeda karena terdiri dari sel-sel yang mengalami proses diferensiasi. Proses pendewasaan ditunjukkan dengan terbentuknya jaringan seperti korteks jaringan dasar, epidermis protoderm, bulu akar modifikasi epidermis, dan xylem dan floem dari prokambium.



Gambar 6.4. Pertumbuhan Primer pada Akar
Sumber: (Hana, 2022)

Pertumbuhan Primer Pada Batang

Pertumbuhan dan perkembangan primer batang termasuk:

- a. Zona pertumbuhan, di mana pembelahan sel terus terjadi pada ujung tunas yang biasanya disebut kuncup.
- b. Zona pemanjangan. zona perpanjangan memainkan peran dalam perpanjangan batang.
- c. Daerah diferensiasi. Terbentuknya xylem dan floem primer dari prokambium, epidermis protoderm, dan empulur dari perubahan meristem dasar menunjukkan pendewasaan sel-sel pada zona diferensiasi.

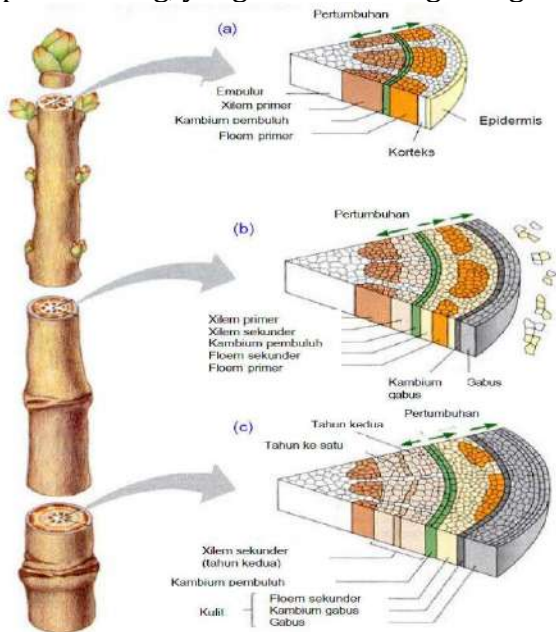


Gambar 6.5. Pertumbuhan Primer pada Ujung Batang
Sumber: (Hana, 2022)

2. Pertumbuhan Sekunder

Pertumbuhan sekunder menyebabkan bertambah besarnya diameter batang yang terjadi akibat aktivitas sel-sel meristem di antara xylem dan floem. Kambium, yang sel-selnya aktif membelah, terletak di antara xylem dan floem. Kambium berkembang membentuk floem sekunder dan xylem sekunder ke arah dalam. Akibatnya, batang tumbuhan menjadi lebih besar. Semua jaringan di dalam kambium disebut kayu. Jaringan di luar kambium dikenal sebagai kulit atau papagan. Karena aktivitas kambium mempengaruhi pembentukan xylem dan floem sekunder pada batang. Jika

kondisi lingkungan kurang baik, aktivitas kambium menjadi rendah, menghasilkan sedikit xylem dan floem sekunder. Sebaliknya, aktivitas kambium ini akan meningkat selama musim hujan. Perbedaan dalam aktivitas kambium akan ditandai pada batang, yang dikenal sebagai lingkaran tahun.



Gambar 6.6. Pertumbuhan Sekunder pada Batang
 Sumber: (Hana, 2022)

Pada gambar (a), jaringan hasil pertumbuhan primer terdiri dari lapisan epidermis, korteks, floem primer, kambium primer, kambium vaskuler atau pembuluh, xilem primer, dan terakhir, tempulur. Pada tahap ini, kambium vaskulernya belum berubah.

Gambar (b) menunjukkan bahwa xilem sekunder dan floem sekunder baru dibentuk melalui pembelahan sel-sel kambium vaskuler. Ini menunjukkan awal pertumbuhan sekunder. Gambar (b) memiliki batang yang lebih lebar daripada gambar (a). Pada titik ini, lapisan epidermis juga mengalami penurunan dan kehilangan sifatnya.

Gambar (c) menunjukkan bahwa batang tanaman semakin lebar. Aktivitas pembelahan kambium vaskuler, yang diikuti oleh pembelahan kambium gabus untuk menggantikan epidermis yang hilang pada tahap sebelumnya, menyebabkan penambahan lebar dan pertumbuhan lingkaran sekunder.

6.5.3 Fase Reproduksi

Fase reproduksi pada tumbuhan adalah tahapan penting dalam siklus hidup yang melibatkan pembentukan dan perkembangan organ reproduksi seperti bunga, buah dan biji. Proses reproduksi tumbuhan dibagi menjadi beberapa langkah yaitu:

1. Penyerbukan

Penyerbukan adalah ketika gamet jantan (serbuk sari) menempel pada kepala gamet betina (putik). Ini bisa terjadi melalui:

- a. Penyerbukan sendiri: Putik yang sama menerima serbuk sari dari bunga yang sama.
- b. Penyerbukan silang: Kepala putik memiliki serbuk sari dari berbagai bunga.

2. Pembuahan

Setelah penyerbukan, pembuahan dilakukan. Tumbuhan berbunga, atau angiosperma, memiliki pembuahan ganda. Satu sel sperma membuahi ovum untuk membentuk zigot, dan sel sperma lainnya membuahi inti kandung lembaga sekunder untuk membentuk endosperma, yang akan berfungsi sebagai cadangan makanan bagi embrio.

3. Pembentukan Bakal Biji

Setelah pembuahan, zigot akan berkembang menjadi embrio, dan bakal biji akan berkembang menjadi biji dengan embrio dan endosperma sebagai sumber makanannya.

4. Perkecambahan

Ketika kondisi lingkungan mendukung, biji akan berkecambah. Proses ini dimulai dengan imbibisi (penyerapan air), diikuti oleh aktivitas hormon giberelin yang memicu pertumbuhan embrio dan pembentukan akar serta batang baru.

Tumbuhan dapat berkembangbiak melalui dua cara yaitu:

- a. Reproduksi secara generative (seksual) yaitu melibatkan penyerbukan dan pembuahan untuk menghasilkan keturunan baru yang memiliki variasi genetik.
- b. Reproduksi secara aseksual (*vegetative*) yaitu tanpa pembuahan, melalui metode seperti stek, cangkok, atau pembelahan untuk menghasilkan individu baru yang identik dengan induknya.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad Nurhakim & Pratita Atinirmala. 2022. Pembahasan pertumbuhan primer dan sekunder pada tumbuhan. <https://bit.ly/4eTsTYc>
- Apon Purnamasari. 2020. Pertumbuhan dan perkembangan biologi-Kelas XII. Direktorat SMA, Direktorat Jenderal PAUD, DIKDAS dan DIKMEN.
- Arfan Hamid & Pratita Atinirmala. 2022. Pembahasan tipe perkecambahan hipogaeal dan epigaeal lengkap. <https://bit.ly/3ZkzMfc>
- Asriani Taridal. 2019. Pertumbuhan dan perkembangan. E-modul direktorat pembinaan SMA-Kementerian pendidikan dan kebudayaan.
- Ely Rudyatmi., Endah Peniati & Ning Setiati. 2016. Pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Kementerian pendidikan dan kebudayaan direktorat jenderal guru dan tenaga kependidikan.
- Embun Bening Diniari. 2018. Factor-faktor pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Ruang Guru.com. <https://bit.ly/49gnJUM>
- Hana Lintang. 2022. Pertumbuhan primer dan sekunder tumbuhan-materi biologi kelas 11. <https://bit.ly/30An1s4>
- Maria Ulfa. 2021. Factor-faktor yang mempengaruhi perkembangan dan pertumbuhan tanaman. Tirto.id. <https://bit.ly/41cfAPd>
- Nana. 2022. 7 faktor internal dan eksternal yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan. Mamikos.com. <https://bit.ly/4fV23A3>
- <https://www.pijarbelajar.id/blog/pertumbuhan-dan-perkembangan-pada-tumbuhan>.

BAB 7

HORMON DAN ZAT PENGATUR TUMBUH

Oleh Saraswati Prabawardani

7.1 Pendahuluan

Pertumbuhan dan perkembangan tanaman sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor internal dan eksternal. Salah satu faktor internal yang krusial adalah keberadaan hormon tanaman atau fitohormon. Hormon tanaman merupakan senyawa organik yang diproduksi secara alami oleh tanaman dalam jumlah kecil dan berperan dalam mengatur berbagai proses fisiologis, mulai dari pertumbuhan dan perkembangan tanaman, dan responsnya terhadap lingkungan. Hormon tanaman (Fitohormon) adalah senyawa organik bukan nutrisi yang aktif dalam jumlah kecil ($< 1\text{mM}$) yang disintesis pada bagian tertentu tanaman, dan pada umumnya ditranslokasikan kebagian lain tanaman dimana senyawa tersebut menghasilkan suatu tanggapan secara biokimia, fisiologis dan morfologis (Moore, 1989).

Istilah "hormon" berasal dari bahasa Yunani yang berarti "pembawa pesan kimiawi" (*Chemical messenger*) dan awalnya digunakan dalam konteks fisiologi hewan. Fitohormon ini mencakup berbagai jenis seperti auksin, giberelin, sitokinin, etilen, dan asam absisat, yang masing-masing memiliki fungsi spesifik dalam mengatur pertumbuhan dan respons tanaman terhadap lingkungannya. Hormon tanaman tidak dihasilkan oleh jaringan khusus seperti pada hewan, tetapi oleh jaringan non-spesifik, biasanya jaringan meristematik yang menghasilkan hormon ketika mendapat rangsangan.

Selain hormon tanaman, terdapat pula zat pengatur tumbuh (ZPT) yang mencakup hormon alami (dikenal sebagai zat pengatur tumbuh endogen) dan zat pengatur tumbuh sintetis (berasal dari luar tumbuhan atau eksogen) yang dapat meniru atau

mempengaruhi fungsi hormon tumbuhan, sehingga digunakan untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. ZPT sintetis ini berkembang seiring dengan kemajuan pengetahuan biokimia dan industri kimia. Ternyata banyak senyawa yang ditemukan memiliki efek fisiologis mirip dengan hormon tanaman (fitohormon).

ZPT sering digunakan dalam praktik pertanian modern untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil tanaman. ZPT ini dapat merangsang atau menghambat proses fisiologis tertentu dalam tanaman, tergantung pada jenis dan konsentrasi yang digunakan. Pemahaman yang mendalam tentang hormon tanaman dan ZPT sangat penting bagi agronomis dan petani dalam mengoptimalkan pertumbuhan tanaman dan hasil panen. Dengan menggunakan kombinasi yang tepat dari hormon dan ZPT, berbagai tantangan dalam budidaya tanaman lebih mudah diatasi, termasuk peningkatan ketahanan terhadap stres lingkungan, peningkatan kualitas buah, dan efisiensi penggunaan nutrisi.

7.2 Jenis-jenis Hormon Tanaman

7.2.1 Auksin

Auksin adalah salah satu jenis hormon tanaman yang berperan penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Diantara fitohormon, auksin adalah hormon tanaman yang pertama kali diidentifikasi. Auksin ditemukan pertama kali oleh Charles Darwin yang mengamati bagaimana tanaman merespons cahaya. Sejak tahun 1880, Darwin dan Darwin (1880) serta von Sachs (1880) mengusulkan keberadaan senyawa yang mengatur pertumbuhan tanaman (Hemantaranjan *et al.*, 2017). Saat ini, auksin diketahui berperan utama dalam pengaturan pertumbuhan dan perkembangan berbagai organ tanaman.

Indole Asetic Acid (IAA) adalah auksin endogen atau auksin alami yang terdapat pada tanaman. Sebelumnya IAA diduga diproduksi terutama pada daun muda dan diangkut ke seluruh tubuh tanaman. Namun, berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa auksin dapat disintesis di hampir semua jaringan, termasuk akar (Yang *et al.*, 1993; Cortleven and Schmölling, 2015).

Fitohormon auksin sangat penting untuk pertumbuhan tanaman dan mengatur banyak proses perkembangan (Woodward dan Bartel, 2005). Meskipun banyak senyawa alami dan sintetis menunjukkan aktivitas seperti auksin dalam bioassay, IAA diakui sebagai auksin utama untuk sebagian besar tanaman. IAA disintesis baik dari asam amino triptofan (Trp) menggunakan jalur yang bergantung pada Trp maupun dari prekursor Trp indolik melalui jalur yang tidak bergantung pada Trp (Woodward dan Bartel *et al.*, 2005).

Beberapa fungsi Auksin:

1. Pemanjangan sel: Auksin mendorong pemanjangan sel di bagian batang, yang membuat tanaman tumbuh lebih tinggi. Kebutuhan optimal IAA untuk pemanjangan atau pertumbuhan batang adalah sekitar 10^{-5} M. Namun, tunas aksileri membutuhkan konsentrasi IAA yang jauh lebih tinggi (10^{-8} M) untuk pertumbuhan dan kemunculannya. Biasanya, pemanjangan batang tanaman berbanding lurus dengan logaritma konsentrasi IAA hingga optimum. Peningkatan konsentrasi lebih lanjut menghambat pertumbuhan (Yang *et al.*, 1993)
2. Pengaturan pertumbuhan akar: Auksin dapat merangsang pertumbuhan akar. Auksin disintesis oleh tanaman di meristem apikal pucuk, daun muda, biji, dan buah, dan merangsang pertumbuhan pemanjangan pucuk serta pembentukan akar adventif dan lateral (Sosnowski *et al.*, 2023).
3. Pertumbuhan daun: Daun menghasilkan auksin dan jumlahnya berkorelasi dengan laju pertumbuhannya. Kandungan auksin menurun seiring bertambahnya usia daun. Oleh karena itu, auksin diperlukan untuk pertumbuhan daun (Mueller-Roeber dan Balazadeh, 2013). Namun, jika auksin diberikan pada daun muda secara eksternal, akan menyebabkan pemanjangan urat daun dan menghambat perkembangan jaringan mesofil (Kneuper *et al.*, 2021).
4. Dominansi apikal: Auksin mempertahankan dominansi apikal, dimana tunas pucuk tumbuh lebih cepat dibandingkan tunas samping (Moore, 1974). Pada beberapa tanaman seperti mayana, batang utama terus tumbuh dan tunas lateral di ketiak daun tidak muncul dan tumbuh menjadi cabang. Namun, ketika ujung

batang utama dipotong atau ketika berakhir di perbungaan tunas lateral muncul menjadi cabang. Dalam kedua kasus tersebut, pengaruh pucuk pada tunas lateral hilang. Fenomena penghambatan tunas lateral oleh pucuk pucuk ini disebut dominasi apikal.

5. Diferensiasi jaringan vascular: Diferensiasi turunan kambium menjadi xilem dan floem juga berada dibawah kendali auksin, melalui interaksi auksin dan giberelin. Ketika IAA diaplikasikan, hasilnya adalah stimulasi pembelahan kambium. Sel-sel baru yang terbentuk terdiferensiasi menjadi xilem yang dominan, sebaliknya diferensiasi floem sangat kurang. Namun, aplikasi GA3 juga merangsang pembelahan kambium. Turunan kambium menjadi terdiferensiasi menjadi sebagian besar floem. Kombinasi aplikasi IAA dan GA3 menghasilkan diferensiasi xilem dan floem yang rasionya ditentukan oleh rasio kedua hormon ini. Jaringan pembuluh pada tumbuhan sangat penting untuk memberikan dukungan fisik dan mengangkut air, gula, hormon, dan molekul sinyal lainnya ke seluruh tumbuhan (De Rybel *et al.*, 2016).
6. Pembungaan: Terdapat beberapa tanaman yang auksinnya menyebabkan pembentukan bunga. Pada tanaman nanas (*Ananas comosus*) pemberian NAA dan 2, 4-D menyebabkan pembungaan. Di sini, pengaruh auksin tidak secara langsung tetapi dimediasi melalui pembentukannya oleh etilena. Pada tanaman ini, etilena yang berbentuk gas juga menyebabkan pembungaan (Burg dan Burg, 1966).
7. Pembentukan Buah dan Induksi Partenokarpi: Auksin membantu dalam proses pembentukan buah tanpa biji (partenokarpi). Partenokarpi mengacu pada perkembangan buah tanpa pembuahan. Akibatnya, buah-buahan tersebut umumnya tidak berbiji. Pada beberapa varietas tanaman buah, penyerbukan yang diikuti oleh pembuahan sangat penting sebelum ovarium berkembang menjadi buah. Auksin mengendalikan banyak aspek perkembangan buah, termasuk pembentukan buah, pertumbuhan, dan pematangan (Ludwig-Müller, 2022).
8. Fototropisme dan Gravitropisme: Auksin memainkan peran dalam respons tanaman terhadap cahaya (fototropisme) dan gravitasi (gravitropisme). Pergerakan organ tanaman sebagai

respons terhadap fluks arah atau gradien dalam rangsangan lingkungan disebut tropisme. Pergerakan organ tanaman baik ke arah atau menjauhi cahaya dikenal sebagai fototropisme. Ketika tanaman terkena cahaya dari samping (iluminasi unilateral), batang membengkok ke arah cahaya dan akar bersifat fototropik negatif. Namun, pembengkokan fototropik positif dan negatif berubah pada tanaman yang lebih tua dan ketika intensitas cahaya yang sangat tinggi digunakan. Tidak semua panjang gelombang cahaya sama efektifnya dalam menyebabkan pembengkokan fototropik (Haga dan lino, 2006).

Pembengkokan organ tanaman yang disebabkan oleh tarikan gravitasi disebut geotropisme. Ada beberapa contoh geotropisme yaitu, ketika batang tumbuh menjauh dari tanah, maka ia bersifat geotropik negatif. Ketika akar tunggang tumbuh ke arah tarikan gravitasi bumi, maka bersifat geotropik positif. Ketika orientasi akar tunggang sejajar dengan arah gravitasi, maka bersifat ortogeotropik. Rimpang dan stolon tumbuh secara horizontal, yaitu tegak lurus dengan arah rangsangan, keduanya bersifat diageotropik. Cabang lateral dan akar lateral tumbuh miring, keduanya bersifat plagiotropik dalam respons geotropik organ vegetatif utama. Cholodny (1931) dan Went dan Thimann (1937) mengusulkan bahwa pertumbuhan diferensial yang ditunjukkan oleh batang atau akar yang ditempatkan secara horizontal disebabkan oleh akumulasi auksin di sisi bawah. Akumulasi auksin pada sisi bawah batang yang ditempatkan secara horizontal ini menyebabkan pertumbuhan yang dipercepat pada sisi bawah tersebut dan mengakibatkan lengkungan batang ke atas (geotropisme negatif).

7.2.2 Giberelin

Giberelin atau asam giberelat (GA) adalah salah satu jenis hormon tanaman (fitohormon) yang berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman. Giberelin adalah keluarga besar hormon tanaman tetrasiklik, diterpenoid yang menginduksi berbagai respons pertumbuhan tanaman ([Ueguchi-Tanaka et al., 2007](#)). Giberelin ditemukan pertama kali dari jamur *Gibberella fujikuroi* (sekarang diklasifikasi menjadi *Fusarium fujikuroi*), yang

menyebabkan penyakit *bakanae* yang diterjemahkan sebagai bibit konyol. Penyakit padi ini merupakan akibat dari infeksi jamur yang menimbulkan gejala pemanjangan bibit yang berlebihan dan kemandulan. Peristiwa ini terjadi pada akhir abad ke-19 di Jepang (Hedden dan Sponsel, 2015). Nama giberelin berasal untuk komponen aktif *Gibberella fujikuroi*.

Pengaruh besar giberelin terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman, khususnya pada pemulihan pertumbuhan mutan kerdil, induksi pembentukan dan pembungaan pada beberapa spesies roset, mendorong spekulasi bahwa metabolit jamur ini merupakan pengatur pertumbuhan tanaman endogen dan hal ini dikonfirmasi oleh karakterisasi kimia pada akhir tahun 1950-an (Hill dan Smith, 1960). Giberelin kini diketahui terdapat di tanaman vaskular, dan beberapa spesies jamur dan bakteri. Biosintesis giberelin pada tanaman dan jamur sebagian besar telah diselesaikan dalam hal jalur, enzim, gen, dan regulasinya.

Giberelin diketahui memiliki efek kuat pada pertumbuhan tanaman, dengan kemampuan menyelamatkan mutan kerdil jagung dan kacang polong, serta mendorong pembentukan dan pembungaan pada spesies roset, seperti tanaman kubis. Efek ini juga dapat diperoleh dengan ekstrak tanaman, yang memberikan indikasi kuat bahwa giberelin merupakan metabolit tanaman endogen. Hal ini dibuktikan oleh isolasi giberelin A1 (GA1) dari biji kacang panjang (*Phaseolus unguiculata*) yang masih muda pada tahun 1958 (MacMillan dan Suter, 1958). Sejak saat itu, terdapat kemajuan dalam memahami biosintesis giberelin, jalur-jalurnya digambarkan dalam *G. fujikuroi* dan tanaman tingkat tinggi pada tahun 1970-an, dengan sifat enzim yang berpartisipasi dikarakterisasi untuk tanaman pada tahun 1980-an. Kemajuan dalam memahami aksi giberelin awalnya lambat, karena sebagian besar pekerjaan awal difokuskan pada aleuron sereal, yang merespons giberelin dengan mensintesis dan mengeluarkan enzim hidrolitik seperti α -amilase.

Seluruh asam giberelat yang terjadi secara alami dan sintetis dicirikan dengan nomor "A". Nomor ini tidak menunjuk pada hubungan kimia, namun merupakan nomor urut penemuan asam giberelat. GA₃ dan GA₂₀ yang juga dikenal sebagai asam giberelat,

merupakan salah satu dari GA pertama yang diisolasi dan dibuat karakterisasinya. Karena GA₃ bisa diekstrak dari kultur jamur, bentuk GA ini sangat komersil, banyak tersedia, dan paling banyak dipelajari. Sebaliknya GA₁, GA₂₀, dan kedua GA₁₉-GAs, diduga paling aktif, dan merupakan GA terpenting pada tumbuhan tingkat tinggi (Hedden dan Sponsel, 2015).

Beberapa fungsi giberelin:

1. Pemanjangan batang: Giberelin merangsang pemanjangan batang dengan mempercepat pembelahan dan pemanjangan sel. Hal ini sangat penting untuk pertumbuhan tanaman, membantu tanaman memperoleh lebih banyak sinar matahari untuk fotosintesis. Aplikasi GA₃ pada tanaman tomat membantu sintesis protein termasuk berbagai enzim, meningkatkan laju pemanjangan tunas dan kapasitas fotosintesis (Mostafa dan Saleh, 2006).
2. Pembungaan: Giberelin dapat mempengaruhi proses pembungaan, terutama pada tanaman yang memerlukan vernalisasi atau respons terhadap panjang hari. GA juga mengatur inisiasi bunga dan perkembangannya, dan sangat penting untuk kesuburan organ jantan dan organ betina, namun bukan untuk diferensiasi organ bunga (Griffiths *et al.*, 2006). Kekurangan GA pada Arabidopsis dan tomat menunjukkan perkembangan benang sari yang abnormal (Chhun *et al.*, 2007; Hu *et al.*, 2008; Rieu *et al.*, 2008). Sedangkan kekurangan GA yang ekstrem menunjukkan kemandulan pada bunga betina (Rieu *et al.*, 2008).
3. Perkecambahan biji: Giberelin membantu memecah dormansi biji dan merangsang perkecambahan dengan mengaktifkan enzim yang memecah cadangan makanan dalam biji. Giberelin merupakan senyawa penting untuk mengatur organisasi temporal fase pematangan pada jagung (White *et al.*, 2000) Embriogenesis awal pada jagung mengakumulasi lebih banyak GA bioaktif dan konsentrasinya menurun seiring dengan peningkatan kadar ABA. Hubungan serupa antara GA dan ABA dilaporkan terjadi pada jelai dan gandum (Gubler, 2002; Jacobsen dan Chandler, 1987). GA dan ABA yang antagonis satu sama lain mempertahankan hubungan

antara vivipari dan masa istirahat; terjadi pada atau sebelum tahap 2 perkembangan embrio (White *et al.*, 2000). Namun, tingkat di mana ekspresi gen dipengaruhi oleh modulasi GA masih harus ditentukan. Vivipari adalah peristiwa dimana biji tanaman mulai berkecambah saat masih berada dalam buah atau induk tanaman, bukan setelah mereka jatuh ke tanah. Hal ini bisa terjadi pada beberapa jenis tanaman, seperti kakao, jagung, dan beberapa spesies buah lainnya.

4. Pembentukan buah: Giberelin dapat merangsang pembentukan buah tanpa biji (partenokarpi), seperti pada anggur dan beberapa jenis buah lainnya. Aplikasi GA dapat menyebabkan pembentukan buah dan pertumbuhan beberapa buah, dimana auksin tidak mempunyai pengaruh (Taiz dan Zeiger, 2002). Pemberian GA 50 ppm dapat meningkatkan jumlah tandan buah tomat per tanaman, diameter buah, berat buah per tanaman dan hasil tanaman tomat. Thakur *et al.* (1996) menunjukkan bahwa keasaman buah tomat berkurang ketika seluruh tanaman disemprot dengan GA3 dan 2,4-D. Kandungan gula yang lebih tinggi dalam buah tomat diperoleh dari tanaman yang diberikan dengan 50 mg/l GA3 (Kataoka *et al.*, 2009).
5. Perluasan daun: Giberelin membantu perluasan daun dengan mendorong pembesaran sel dan peningkatan berat kering daun (Ballantyne, 1995). Gabal *et al.* (1999) mengungkapkan bahwa jumlah daun tanaman meningkat dengan aplikasi zat pengatur tumbuh terutama GA pada tomat pada 15, 30 dan 45 hari sesudah tanam. Hal ini diduga disebabkan oleh zat pengatur tumbuh yang meningkatkan pembelahan sel dengan pemanjangan batang yang signifikan. Aplikasi GA3 tampaknya meningkatkan pertumbuhan vegetatif (Gelmese *et al.*, 2012)
6. Produksi enzim: GA mengatur produksi enzim yang terlibat dalam berbagai jalur metabolisme, membantu perkembangan tanaman secara keseluruhan. Embrio tanaman barley mengeluarkan zat seperti giberelin yang secara alami mendorong sel-sel aleuron untuk memproduksi enzim amilolitik (Moore, 1974). Enzim amilolitik adalah kelompok

enzim yang bertanggung jawab untuk menghidrolisis atau memecah molekul pati (amilum) menjadi gula sederhana seperti maltosa dan glukosa.

7.2.3 Sitokinin

Sitokinin adalah hormon tumbuhan penting dalam berbagai proses fisiologi. Sitokinin sangat berperan dalam regulasi pembelahan sel dan morfogenesis. Sitokinin yang terjadi secara alami adalah molekul berbasis purin yang disubstitusi pada atom C6 baik oleh rantai samping isoprena atau inti aromatik. Dengan demikian sitokinin adalah turunan substitusi N⁶ dari basa nitrogen adenin purin, dicirikan oleh kemampuannya merangsang pembelahan sel dalam kultur jaringan, meski auksin dan asam giberelat mempengaruhi spektrum respon, termasuk meningkatkan jumlah sel. Kinetin (N⁶-furfurylamino purine) merupakan salah satu jenis sitokinin pertama yang diidentifikasi. Hormon ini berperan dalam merangsang pembelahan sel (sitokinesis) dan mengatur berbagai aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Kinetin bekerja sama dengan auksin untuk mempengaruhi diferensiasi jaringan. Kinetin sering digunakan dalam kultur jaringan tanaman dan penelitian bioteknologi untuk mengendalikan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Ketika auksin diberikan dalam konsentrasi tinggi, kalus cenderung membentuk primordia akar. Sebaliknya, pada konsentrasi kinetin yang tinggi, kalus lebih cenderung membentuk primordia batang atau tunas (Hosseini *et al.*, 2015; Maiuri dan Truant, 2020).

Kinetin sebenarnya bukan hormon yang secara alami ditemukan dalam tumbuhan, namun awalnya disintesis dari DNA herring sperm, dan merupakan turunan dari adenin, sebuah nukleotida dalam DNA (Barciszewski *et al.*, 1999). Namun, kinetin memiliki struktur dan fungsi yang mirip dengan sitokinin alami yang ditemukan dalam tanaman, seperti zeatin. Kinetin sering digunakan dalam penelitian dan aplikasi praktis karena stabilitasnya dan kemampuannya untuk merangsang pembelahan sel dan pertumbuhan tanaman dalam kultur jaringan (Barciszewski *et al.*, 1999). Sitokinin yang terdapat secara alami pada tumbuhan tingkat tinggi adalah zeatin. Zeatin dan sitokinin alami lain

umumnya terikat dengan ribose (atau ribosida) atau ribose-fosfat pada nomor 9 (Jameson, 2023).

Beberapa fungsi sitokinin:

1. Pembelahan sel (Sitokinesis): Salah satu fungsi utama sitokinin adalah merangsang pembelahan sel dalam tanaman dan kultur jaringan. Sitokinin bekerja sama dengan hormon lain seperti auksin untuk mengatur pertumbuhan dan pembelahan sel (Sosnowski *et al.*, 2023).
2. Pertumbuhan tunas: Sitokinin mendorong pertumbuhan tunas lateral dan mencegah dominasi apikal, dimana tunas utama tumbuh lebih cepat dibandingkan tunas samping. Ini membantu tanaman untuk bercabang lebih banyak. Sitokinin mempengaruhi morfogenezis dalam kultur jaringan. Mempertahankan pertumbuhan kalus yang tidak terdiferensiasi umumnya dicapai melalui konsentrasi yang sama antara sitokinin dan auksin. Tingginya ratio sitokinin terhadap auksin cenderung merangsang perkembangan tunas, sedangkan tingginya ratio auksin ke sitokinin akan mendorong perkembangan akar (Devlin dan Witham, 1983)
3. Pembentukan dan pembesaran kloroplas: Sitokinin berperan dalam pembentukan dan memperbanyak kloroplas dalam sel daun yang penting untuk fotosintesis (Cortleven dan Schmölling, 2016).
4. Penundaan penuaan (*Senescence*) daun: Sitokinin dapat menunda proses penuaan pada daun dengan menghambat degradasi klorofil dan protein serta mencegah kerusakan oksidatif sehingga daun tetap hijau lebih lama (Höning *et al.*, 2018). Sitokinin juga memperlambat proses penuaan pada buah, dan organ lain pada tanaman (Sosnowski *et al.*, 2023).
5. Translokasi nutrisi: Sitokinin mempengaruhi distribusi dan translokasi nutrisi dalam tanaman, memastikan bahwa nutrisi penting sampai ke bagian tanaman yang membutuhkan (Kieber dan Schaller, 2018).
6. Pengaruh terhadap pembungaan dan buah: Sitokinin dapat mempengaruhi proses pembungaan dan pembentukan buah, meskipun perannya sering kali lebih bersifat mendukung

dibandingkan dengan hormon lain seperti giberelin (Sosnowski *et al.*, 2023).

7.2.4 Etilen

Hormon etilen sangat penting dalam berbagai proses fisiologis. Etilen adalah hormon yang terlibat dalam perkembangan, metabolisme, dan respons stres pada tanaman. Etilen merupakan gas yang tidak berwarna dan mudah menguap. Etilen juga ditemukan dalam berbagai bagian tanaman seperti daun, akar, bunga, buah, dan biji (Khan *et al.*, 2024). Para peneliti telah menunjukkan berbagai peran hormon ini dalam perkembangan tanaman, sebagai agen pemberi sinyal, dalam perkembangan daun, penuaan, pematangan buah, dalam peningkatan perkecambahan, dll. Konsentrasi etilen yang rendah memfasilitasi aktivasi sinyal pertahanan pada tanaman, sedangkan konsentrasinya yang tinggi tampaknya menghambat perkembangan pada *Triticum aestivum* dan *Cucumis sativus* (Chang *et al.*, 2010; Khan *et al.*, 2013; Riyazuddin, 2020).

Beberapa fungsi etilen

1. Pematangan buah: Etilen memainkan peran utama dalam mematangkan buah. Etilen berperan penting dalam pengaturan pematangan buah dengan mengatur ekspresi gen yang terlibat dalam berbagai proses biologis. Proses ini meliputi akumulasi pigmen, respirasi, produksi etilen, perubahan tekstur, dan peningkatan kualitas buah secara keseluruhan (Liu *et al.*, 2020). Ketika buah mulai matang, produksi etilen meningkat, yang mempercepat proses pematangan dengan mendorong pemecahan dinding sel dan perubahan pati menjadi gula (Allen dan Karst, 2019).

Buah dapat dikategorikan menjadi dua jenis berdasarkan pola respirasinya dan kemampuan untuk matang setelah dipetik: buah klimaterik dan buah non klimaterik (Fukano dan Tachiki, 2021). Buah klimaterik adalah buah yang memasuki fase klimaterik setelah dipetik, yang berarti buah ini akan terus matang setelah dipetik. Buah ini menghasilkan gas etilen yang bertanggung jawab atas proses pematangan, contoh mangga, pepaya, pisang, apel, nangka, durian, jambu biji. Sebaliknya buah

non-klimaterik adalah buah yang tidak melanjutkan proses pematangan setelah dipetik. Buah ini tidak merespons gas etilen dan hanya dapat matang jika dibiarkan menempel pada induknya, contoh jeruk, anggur, beri, melon, nanas, salak, strowberi.

2. Senescence (Penuaan) daun dan bunga: Etilen dapat mempengaruhi proses penuaan dan gugurnya (absisi) pada daun. Selain buah dan daun, etilen juga merangsang absisi bunga pada berbagai spesies tanaman. Produksi etilen pada buah, daun dan bunga menggerakkan enzim yang menyebabkan hancurnya dinding sel dengan cara absisi. Absisi daun merupakan proses dinamis yang penting dalam mengganti daun tua dalam siklus vegetatif. Absisi daun dicapai melalui formasi lapisan sel parenchyma, biasanya pada dasar petiole (tangkai daun). Absisi dikontrol oleh interaksi antara etilen dan auksin. Kalau etilen mendorong absisi, auksin mengurangi sensitifitas sel terhadap zona absisi sehingga mencegah absisi (Abeles *et al.*, 1971; Iqbal *et al.*, 2017; Botton dan Ruperti, 2019).
3. Arah pertumbuhan: Etilen dapat mempengaruhi arah pertumbuhan tanaman, terutama ketika tanaman mengalami tekanan fisik atau stres. Misalnya, biji yang mengalami tekanan akan menghasilkan lebih banyak etilen yang mempengaruhi biji untuk tumbuh ke samping sebelum tumbuh ke atas (Ma *et al.*, 2014; Fatma *et al.*, 2022).
4. Induksi Bunga: Auksin dapat menginduksi produksi etilen pada tanaman (Burg dan Burg, 1966), dan selanjutnya etilen dapat mempengaruhi induksi bunga dan pembentukan bunga bersama-sama dengan auksin (Iqbal *et al.*, 2017). Interaksi ini penting untuk berbagai proses perkembangan tanaman (Iqbal *et al.*, 2017), misalnya pada nanas, auksin merangsang pembentukan etilen yang pada gilirannya mendorong pembungaan.

7.2.5 Asam Absisat (ABA)

Asam absisat dikenal sebagai ABA (Absciscic Acid) berperan penting dalam berbagai proses fisiologis tanaman (Mo *et al.*, 2024). Asam absisat merupakan molekul seskuiterpenoid yang terdiri dari

15 atom karbon. Asam absisat disintesis dari karotenoid dalam kloroplas. Biosintesis ABA melibatkan perombakan karotenoid C40, dengan menghasilkan pembentukan C15 ABA. Fitohormon ini ditemukan pada tahun 1963 oleh Frederick Addicott dan Larry A. Davis yang berhasil mengisolasi senyawa absicin I dan II, yaitu senyawa yang bertanggung jawab atas gugurnya buah tanaman kapas (Dörffling, 2015). Senyawa absicin II kemudian dikenal sebagai asam absisat. Asam absisat dikenal sebagai hormon tumbuhan yang berfungsi menghambat pertumbuhan (Dörffling, 2015; Singh dan Roychoudhury, 2023). Berikut adalah beberapa poin penting mengenai peran antagonisnya terhadap hormon lain seperti auksin dan giberelin.

Fungsi Asam Absisat (ABA)

1. Dormansi tunas dan benih: ABA menginduksi dormansi pada tunas dan benih, membantu tanaman bertahan hidup dalam kondisi yang tidak menguntungkan dengan mencegah perkecambahan dini (Kermode, 2005; Nambara *et al.*, 2010; Sano dan Marion-Poll, 2021).
2. Absisi: ABA mendorong gugurnya daun, bunga, dan buah yang merupakan proses alami yang membantu tanaman menghemat sumber daya dan merespons isyarat lingkungan (Aneja *et al.*, 1999).
3. Penutupan stomata: Selama kekeringan atau stres air, ABA menyebabkan penutupan stomata untuk mengurangi kehilangan air melalui transpirasi (Leng *et al.*, 2014).
4. Respons terhadap stress atau cekaman: ABA memainkan peran penting dalam membantu tanaman mengatasi berbagai stres abiotik seperti kekeringan, salinitas, dingin, dan panas. (Vishwakarma *et al.*, 2017; Mandeep *et al.*, 2024).
5. Penghambat pertumbuhan: ABA bertindak sebagai penghambat pertumbuhan dengan melawan efek hormon pemacu pertumbuhan lainnya seperti auksin dan giberelin (Shu *et al.*, 2018; Farman *et al.*, 2019).
6. Pembungaan: Pada beberapa tanaman hari pendek, ABA dapat meningkatkan pembungaan (Jing, 2020; Wang *et al.*, 2013)

7.3 Penutup

Hormon dan zat pengatur tumbuh (ZPT) merupakan dua istilah yang sering digunakan dalam konteks pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Perbedaan antara hormon tumbuhan dan ZPT bahwa hormon tumbuhan adalah senyawa alami yang diproduksi oleh tanaman sendiri, sedangkan ZPT mencakup baik hormon alami maupun senyawa sintetis yang dapat mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Fitohormon atau hormon tumbuhan adalah senyawa organik yang tidak termasuk nutrisi tetapi berperan penting dalam mengatur pertumbuhan, perkembangan, dan pergerakan tumbuhan. Fitohormon bekerja dalam jumlah sangat kecil dan dapat mendorong, menghambat, atau mengubah proses biologis pada tumbuhan. Terdapat 5 kelompok hormon tumbuhan utama, yaitu (1) Auksin, berperan dalam pertumbuhan akar dan batang, serta kontrol pembentukan tunas dan dominansi apikal; (2) Giberelin, berperan dalam pemanjangan batang, perkecambahan biji, dan pembungaan; (3) Sitokinin, terlibat dalam pembelahan sel, pembentukan tunas, penundaan penuaan daun, dan mobilisasi nutrisi; (4) Etilen, satu-satunya fitohormon berbentuk gas yang mempercepat proses pematangan buah dan penuaan daun; (5) Asam Absisat, berfungsi sebagai penghambat pertumbuhan dan membantu tumbuhan bertahan dalam kondisi stres.

Selain kelompok utama tersebut, terdapat juga fitohormon lain yang berfungsi untuk beberapa kelompok tumbuhan saja atau merupakan hormon eksogen, seperti brasinosteroid, asam jasmonat, asam salisilat, poliamina, dan karrikin.

DAFTAR PUSTAKA

- Abeles, V.A. 2015. Century of Gibberellin Research. *Journal of Plant Growth Regulation* 34, 740–760.
<https://doi.org/10.1007/s00344-015-9546-1>
- Allen, V.G. dan Karst, R.L. 2019. Ethylene and Fruit Ripening: From Perception to Response. *Plant Physiology* 184(2), 568-569.
- Aneja, M., Gianfagna, T., dan Ng, E. 1999. The roles of abscisic acid and ethylene in the abscission and senescence of cocoa flowers. *Plant Growth Regulation* 27, 149–155.
<https://doi.org/10.1023/A:1006153502897>
- Ballantyne, D.J. 1995. Cultivar, Photoperiod and Gibberellin Influence Shoot Elongation and Photosynthetic Capacity of Hardy Azaleas. *Hort. Sci.* 2, 257-259.
- Barciszewski, J., Rattan, S.I.S., Siboska, G., Clark, B.F.C. 1999. Kinetin — 45 years on. *Plant Science* 148, 37–45.
- Botton, A., dan Ruperti, B. 2019. The Yes and No of the Ethylene Involvement in Abscission. *Plants*, 8(6), 187.
<https://doi.org/10.3390/plants8060187>
- Burg, S.P., dan Burg, E.A. 1966. Auxin-induced ethylene formation: its relation to flowering in the pineapple. *Science* 152(3726), 1269. DOI: 10.1126/science.152.3726.1269. PMID: 5937118
- Chang, C., Wang, B., Shi, L., Li, Y., Duo, L., dan Zhang, W. 2010. Alleviation of Salinity Stress-induced Inhibition of Seed Germination in Cucumber (*Cucumis sativus* L.) by Ethylene and Glutamate. *J. Plant Physiol.* 167, 1152–1156.
- Chhun, T., Aya, K., Asano, K., Yamamoto, E., Morinaka, Y., Watanabe, M., et al. 2007. Gibberellin Regulates Pollen Viability and Pollen Tube Growth In Rice. *Plant Cell* 19, 3876-3888.
<http://dx.doi.org/10.1105/tpc.107.054759> 2007
- Cortleven, A. dan Thomas Schmülling, T. 2015. Regulation of Chloroplast Development and Function by Cytokinin. *Journal of Experimental Botany* 66(16), 4999-5013.
- De Rybel, B., Mäheönen, A.P., Helariutta, Y., dan Weijers, D. 2015. Plant Vascular Development: From Early Specification to Differentiation. *Nature Reviews Molecular Cell Biology* 17(1), 30-40.

- Devlin, R.M. dan Witham, F.H. 1983. *Plant Physiology*. 4th ed. Willard Grant Press; Boston.
- Dörffling, K. 2015. The Discovery of Absciscic Acid: A Retrospect. *Journal of Plant Growth Regulation* 34, 795–808. <https://doi.org/10.1007/s00344-015-9525-6>
- Farman, S., Mushtaq, A., dan Azeem, M.W. 2019. Plant Growth Regulators (PGRs) and Their Applications: A Review. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences* 15, 94-103.
- Fatma, M., Asgher, M., Iqbal N., Rasheed, F., Sehar, Z., Sofo, A., dan Khan, N.A. 2022. Ethylene Signaling under Stressful Environments: Analyzing Collaborative Knowledge. *Plants* 11, 2211. <https://doi.org/10.3390/plants11172211>
- Fukano, Y. dan Tachiki, Y. 2021. Evolutionary Ecology of Climacteric and NonClimacteric Fruits. *Biol. Lett.* 17, 20210352. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2021.0352>
- Gabal, G.M., Oben, G., dan Garcell R. 1999. Effect of GA on Morphophysiological Characters and Yield of Kidney Beans (*Phaseolus vulgaris*). *J. Agron. Crop. Sci.* 160(2), 91-101.
- Gelmesa, D., Abebie, B., dan Desalegn, L. 2012. Regulation of Tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) Fruit Setting and Earliness by Gibberellic Acid and 2,4 Dichlorophenoxy Acetic Acid Application. *African Journal of Biotechnology* 11(51), 11200-11206.
- Gubler, F., Hughes, T., Waterhouse, P., dan Jacobsen, J. 2002. Regulation of Dormancy in Barley by Blue Light and After-Ripening: Effects on Absciscic Acid and Gibberellin Metabolism. *Journal of Experimental Botany* 147(2), 886-896.
- Haga, K. dan Iino, M. 2006. Asymmetric Distribution of Auxin Correlates with Gravitropism and Phototropism But Not With Autostraightening (Autotropism) In Pea Epicotyls. *Journal of Experimental Botany* 57(4), 837–847. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj069>
- Hedden, P. dan Sponsel, V. 2015. A Century of Gibberellin Research. *Plant Growth Regulation* 34,740–760. DOI 10.1007/s00344-015-9456-1

- Hemantaranjan, A., Trivedi, A.K., dan Bhanu, A.N. 2017. Physiological Functions of Auxin Amid Molecular Mechanisms of Auxin Response Factors. https://www.researchgate.net/publication/321070833_Physiological_Functions_of_Auxin_Amid_Molecular_Mechanisms_of_Auxin_Response_Factors
- Hill, J.P.W. dan Smith R.A. 1960. Gibberellins and Plant Growth Regulation. *Journal of Experimental Botany* 41 (4) 521-528.
- Hönig, M., Plíhalová, L., Husíčková, A., Nisler, J., dan Doležal, K. 2018. Role of Cytokinins in Senescence, Antioxidant Defence and Photosynthesis. *International Journal of Molecular Sciences* 19(12), 4045.
- Hosseini, S.Z., Jelodar, N.B., Rahimian, H., dan Ranjbar, G. 2015. Biological Forum – An International Journal 7(2), 1045-1050.
- Hu, J., Mitchum, M.G., Barnaby, N., Ayele, B.T., Ogawa, M., Nam, E., et al. 2008. Potential Sites of Bioactive Gibberellin Production During Reproductive Growth In Arabidopsis. *Plant Cell* 20: 320- 326 <http://dx.doi.org/10.1105/tpc.107.057752Rieu>, 2008
- Iqbal, N., Khan, N.A., Ferrante, A., Trivellini, A., Francini, A., dan Khan, M.I.R. 2017. Ethylene Role in Plant Growth, Development and Senescence: Interaction with Other Phytohormones. *Frontiers in Plant Science* Sec. Plant Physiology 8:475. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00475>
- Jacobsen, J.V. dan Chandler, P.M. 1987. Gibberellin and Absciscic Acid in Germinating Cereals. In: Davies, P.J. (eds) *Plant Hormones and their Role in Plant Growth and Development*. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-3585-3_10
- Jameson, P. A. 2023. Zeatin: The 60th Anniversary of Its Identification, *Plant Physiology* 192(1), 34–55. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiad094>
- Jing, T., Zhang, Na., Gao, T., Wu, Yi., Zhao, M., Jin, J., Du, W., Schwab, W., Song, C. 2020. UGT85A53 promotes flowering via mediating abscisic acid glucosylation and *FLC* transcription in *Camellia sinensis*. *Journal of Experimental Botany* 71 (22), 7018–7029. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa373>

- Kataoka, K., Yashiro, Y., Habu, T., Sunamoto, K., Kitajima, A. 2009. The Addition of Gibberellic Acid to Auxin Solutions Increases Sugar Accumulation and Sink Strength In Developing Auxin-Induced Parthenocarpic Tomato Fruits. *Scientia Horticulturae* 123(2), 228-233.
- Kermode, A.R. 2005. Role of Absciscic Acid in Seed Dormancy. *Journal of Plant Growth Regulation* 24, 319–344. DOI: 10.1007/s00344-005-0110-2
- Khan, M.I.R., Iqbal, N., Masood, A., Per, T.S., Khan, N.A. 2013. Salicylic Acid Alleviates Adverse Effects of Heat Stress on Photosynthesis Through Changes In Proline Production and Ethylene Formation. *Plant Signal. Behav.* 8, e26374.
- Khan, S., Alvi, A. F., dan Khan, N.A. 2024. Role of Ethylene in the Regulation of Plant Developmental Processes. *Stresses* 4(1), 28-53. <https://doi.org/10.3390/stresses4010003>
- Kieber, J.J. dan Schaller, G.E. 2018. Cytokinin Signaling in Plant Development. *Development* 145 (4), dev149344. <https://doi.org/10.1242/dev.149344>
- Kneuper, I., Teale, W., Dawson, J.E., Tsugeki, R., Katifori, E., Palme, K., dan Ditengou, F.A. 2021. Auxin Biosynthesis and Cellular Efflux Act Together To Regulate Leaf Vein Patterning. *Journal Of Experimental Botany* 72, 1151–1165.
- Leng, P., Yuan, B., Guo, Y. 2014. The Role of Absciscic Acid In Fruit Ripening and Responses to Abiotic Stress. *Journal of Experimental Botany* 65(16), 4577–4588. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru204>
- Liu, Y., Tang, M., Liu, M., Su, D., Chen, J., Gao, Y., dan Li, Z. 2020. The Molecular Regulation of Ethylene In Fruit Ripening. *Small Methods* 4, 1900485
- Ludwig-Müller, J. 2022. Auxins in the Right Space and Time Regulate Pea Fruit Development. *Journal of Experimental Botany* 73(12), 3831–3835. <https://doi.org/10.1093/jxb/erac237>
- Ma, B., Chen, H., Chen, S.Y., Zhang, J.S. 2014. Roles of Ethylene in Plant Growth and Responses to Stresses. In: Tran, L.S., Pal, S. (eds) *Phytohormones: A Window to Metabolism, Signaling and Biotechnological Applications*. Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-0491-4_4

- MacMillan, J. dan Suter, P. J. 1958. The occurrence of Gibberellin A1 In Higher Plants: Isolation from The Seed of Runner Bean (*Phaseolus multiflorus*). *Naturwissenschaften* 45(1), 46-47.
- Maiuri, T. dan Truant, 2020. R. Kinetin/N6-furfuryladenine: A New Neurodegenerative Disease Lead from an Old Plant Cytokine. *J Cell Signal* 1(4), 195-199.
- Mandeep, S., Usha, N., Antul, K., Chandan, J. 2024. Signaling for Abiotic Stress Tolerance in Plants: A Review. *Agricultural Reviews*. 45(2), 239-248. DOI: 10.18805/ag.R-2306
- Mo, W., Zheng X., Shi Q., Xuelai Zhao X., Chen X., Zhenming Yang, Z., dan Zuo, Z. 2024. Unveiling the Crucial Roles of Absciscic Acid in Plant Physiology: Implications For Enhancing Stress Tolerance and Productivity. *Front. Plant Sci. Sec. Plant Abiotic Stress* 15 - <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1437184>
- Moore, T.C. 1989. Auxins. *Biochemistry and Physiology of Plant Hormones*. Chapter 2, Hal. 28-93.
- Mostafa, E.A.M dan Saleh, M.M.S. 2006. Influence of Spraying with Gibberellic Acid on Behavior of Anna Apple trees. *J Appl. Sci. Res.* 2, 477- 483.
- Mueller-Roeber, B. dan Balazadeh, S. 2014. Auxin and Its Role in Plant Senescence. *J Plant Growth Regul* 33, 21–33. <https://doi.org/10.1007/s00344-013-9398-5>
- Nambara, E., Okamoto, M., Tatematsu, K., Yano, R., Seo, M., dan Kamiya, Y. 2010. Absciscic acid and the Control of Seed Dormancy and Germination. *Seed Science Research* 20(2):55-67. DOI:10.1017/S0960258510000012
- Rieu, I., Ruiz-Rivero, O., Fernandez-Garcia, N., Griffiths, J., Powers, S.J., dan Gong, F., *et al.* 2008. The Gibberellin Biosynthetic Genes Atga20ox1 and Atga20ox2 Act, Partially Redundantly, To Promote Growth and Development Throughout the Arabidopsis Life Cycle. *Plant J* 53, 488-504; <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-313X.2007.03356.x>
- Riyazuddin, R., Verma, R., Singh, K., Nisha, N., Keisham, M., Bhati, K.K., Kim, S.T., Gupta, R. 2020. Ethylene: A Master Regulator of Salinity Stress Tolerance In Plants. *Biomolecules* 10, 959.
- Sano, N. dan Marion-Poll, A. 2021. ABA Metabolism and Homeostasis in Seed Dormancy and

- Germination. *International Journal of Molecular Sciences* 22(10), 5069. <https://doi.org/10.3390/ijms22105069>
- Shu K., Zhou, W., Chen, F., Luo, X., and Yang, W. 2018. Absciscic Acid and Gibberellins Antagonistically Mediate Plant Development and Abiotic Stress Responses. *Front. Plant Sci. Sec. Plant Physiology* 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00416>
- Sosnowski, J., Truba, M., dan Vasileva, V. 2023. The Impact of Auxin and Cytokinin on the Growth and Development of Selected Crops. *Agriculture* 13(3), 724. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030724>
- Thakur, B.R., Singh, R.K., dan Nelson, P. 1996. Quality Attributes of Processed Tomato Products: A Review. *Food Res. Int.* 12, 375-401.
- Taiz, L. dan Zeiger, E. 1991. *Plant Physiology*. The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc; California.
- Ueguchi-Tanaka, M., Nakajima, M., Motoyuki A., dan Matsuoka, M. 2007. Gibberellin Receptor and Its Role in Gibberellin Signaling in Plants. *Annual Review of Plant Biology*. 58, 183-198. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.58.032806.103830>
- Vishwakarma, K., Upadhyay, N., Kumar, N., dan Yadav, G., *et al.* 2017. Absciscic Acid Signaling and Abiotic Stress Tolerance in Plants: A Review on Current Knowledge and Future Prospects. *Front. Plant Science. Sec. Plant Physiology* 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00161>
- Wang, Y., Li, L., Ye T., Yuming, Lu Y., Chen, X., dan Wu, Y. 2013. The Inhibitory Effect of ABA on Floral Transition is Mediated By ABI5 in *Arabidopsis*, *Journal of Experimental Botany* 64, 2, 675–684. <https://doi.org/10.1093/jxb/ers361>
- White, C.N., Proebsting, W.M., Hedden, P., Rivin, C.J. 2000. Gibberellins and Seed Development in Maize. I. Evidence That Gibberellin/Absciscic Acid Balance Governs Germination versus Maturation Pathways. *Plant Physiology* 122(4), 1081–1088. <https://doi.org/10.1104/pp.122.4.1081>

- Woodward, A.W. dan Bartel, B. 2005. Auxin: Regulation, Action, and Interaction. *Annals of Botany* 95(5), 707–735. <https://doi.org/10.1093/aob/mci083>
- Yang, T., Law, D.M., dan Davies, P.J. 1993. Magnitude and Kinetics of Stem Elongation Induced by Exogenous Indole-3-Acetic Acid in Intact Light-Grown Pea Seedlings. *Plant Physiology* 102(2), 717-724.

BAB 8

KEKUATAN GERAK YANG TERJADI PADA TUMBUHAN

Oleh Abdullah Sarijan

8.1 Pendahuluan

Tumbuhan merupakan organisme autotrofik yang mempunyai berbagai mekanisme untuk beradaptasi dengan lingkungannya. Aspek penting dalam adaptasi ini adalah pergerakan yang terjadi pada bagian tumbuhan. Gerakan ini penting tidak hanya untuk pertumbuhan dan perkembangannya, tetapi juga untuk merespons perubahan lingkungan.

Pergerakan tumbuhan dapat dibedakan menjadi beberapa kategori, antara lain pergerakan endonom, pergerakan higroskopis, dan pergerakan esionom yang masing-masing mempunyai mekanisme fisiologis berbeda.

Gerakan endonom adalah gerakan yang dihasilkan dari proses internal tumbuhan, seperti pertumbuhan sel dan perubahan hormonal. Gerakan higroskopis erat kaitannya dengan perubahan kandungan air didalam sel tumbuhan, sedangkan gerakan esionom adalah gerakan yang dipicu oleh rangsangan lingkungan.

Secara keseluruhan, berbagai jenis pergerakan tumbuhan, baik endom, higroskopis, atau esionom, menunjukkan betapa kompleks dan adaptifnya mekanisme kehidupan tumbuhan. Setiap gerak mempunyai tujuan dan fungsi tertentu, yang menunjang kelangsungan hidup dan pertumbuhan tumbuhan dalam berbagai kondisi. Dengan memahami kekuatan gerakan ini, kita dapat lebih mengapresiasi keajaiban dan keragaman strategi adaptasi yang dimiliki dunia tumbuhan.

8.2 Memahami Kekuatan Gerak pada Tanaman

Kekuatan gerakan pada tumbuhan/tanaman mengacu pada berbagai mekanisme fisiologis yang memungkinkan tumbuhan merespons lingkungannya dan beradaptasi terhadap perubahan kondisi. Gerakan ini bisa aktif atau pasif dan seringkali dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti cahaya, gravitasi, dan kelembapan.

8.2.1 Gerak Endonom

Gerak endonom adalah salah satu jenis gerak pada tumbuhan yang terjadi tanpa adanya rangsangan dari luar. Pergerakan ini dihasilkan dari proses internal tanaman itu sendiri, seperti perubahan metabolisme atau pertumbuhan sel. Dengan kata lain, pergerakan endonom merupakan respon yang berasal dari organisme tumbuhan dan bukan dari pengaruh lingkungan luar.

Contoh Gerak Endonom

1. Pergerakan Kloroplas.

Pergerakan kloroplas dalam sel tumbuhan merupakan salah satu contoh gerak endonom. Gerak ini juga sering disebut sebagai siklosis, yaitu aliran sitoplasma yang memungkinkan organel-organel seperti kloroplas bergerak didalam sel (Imsspada, 2024). Kloroplas dapat berpindah ke area yang lebih terang untuk memaksimalkan fotosintesis.



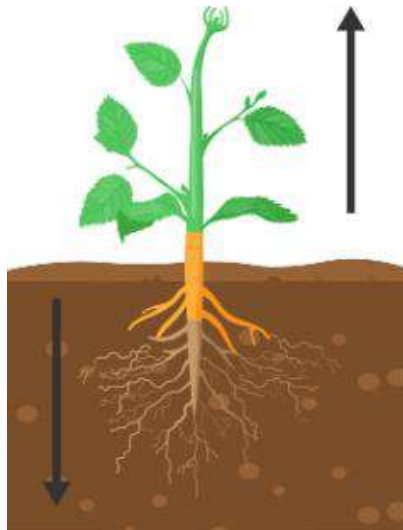
Gambar 8.1. Pergerakan dalam kloroplas

Sumber: <https://bit.ly/gerakkloroplast>

Hal ini terjadi sebagai respons terhadap cahaya, namun pergerakan itu sendiri merupakan hasil proses internal sel. Saat cahaya tersedia, kloroplas berpindah ke area sel yang lebih terang, sehingga dapat menangkap lebih banyak cahaya untuk proses fotosintesis. Sebaliknya, dalam kondisi cahaya redup, kloroplas mungkin menjauh dari sumber cahaya untuk menghindari kerusakan akibat cahaya berlebih.

2. Pertumbuhan Akar dan Batang.

Pertumbuhan akar yang menjulur ke dalam tanah dan batang yang tumbuh ke atas juga merupakan contoh gerakan endonom. Akar tumbuh menuju sumber nutrisi dan kelembapan, sedangkan batang tumbuh menuju cahaya. Meskipun faktor eksternal mempengaruhinya, pertumbuhan ini merupakan hasil proses biologis yang terjadi di dalam tanaman. Pertumbuhan akar ke bawah juga disebabkan oleh pengaruh gaya gravitasi, namun akar juga berperan dalam menyerap unsur hara sehingga bergerak ke bawah guna memperoleh air dan unsur hara sebagai nutrisi untuk pertumbuhannya.



Gambar 8.2. Pergerakan akar dan batang

Sumber: https://bit.ly/gerakakar_batang

3. Gerak Pembungaan.

Proses pembungaan tanaman juga dapat dianggap sebagai gerakan endonom. Tumbuhan menghasilkan bunga pada waktu-waktu tertentu, dipicu oleh perubahan hormonal dalam tubuhnya, meskipun terdapat faktor lingkungan yang kemungkinan memberikan berpengaruh, seperti suhu dan cahaya.

Pergerakan endonom merupakan bagian penting dalam kehidupan tumbuhan yang menunjukkan bagaimana mereka dapat beradaptasi dan merespons kondisi internalnya. Contohnya seperti pergerakan kloroplas, pertumbuhan akar dan batang, serta proses pembungaan menggambarkan bagaimana tumbuhan dapat bergerak dan tumbuh tanpa memerlukan rangsangan dari luar.



Gambar 8.3. Gerakan endonom pada bunga

Sumber: <https://bit.ly/Keluarbunga>

8.2.2 Gerak Higroskopis

Gerak higroskopis merupakan salah satu jenis gerak pada tumbuhan yang terjadi akibat adanya perubahan kadar air dalam sel. Pergerakan ini biasanya terjadi pada bagian tanaman tertentu, seperti daun, batang, atau buah, dan merupakan respons terhadap perubahan kelembapan. Ketika kadar air sel berkurang, bagian tumbuhan dapat menyusut atau berubah bentuk sehingga menimbulkan pergerakan.

Contoh gerak higroskopis:

1. Pembukaan dan penutupan polong

Contoh gerakan higroskopis yang terlihat jelas adalah gerakan polong. Bila kadar air pada sel polong berkurang maka sel pada beberapa bagian akan mengecil sehingga menyebabkan polong terbuka. Sebaliknya bila kadar air bertambah maka polong akan menutup. Pecahnya polong merupakan suatu gerakan higroskopis yang disebabkan oleh penurunan kadar air pada polong (Muallit, 2024).



Gambar 8.4. Pecahnya polong akibat penurunan kadar air

Sumber: <https://images.app.goo.gl/jWicQaR579AF2zA1A>

2. Gerakan daun pada tumbuhan kecil

Beberapa tumbuhan kecil, seperti tumbuhan putri malu, menunjukkan gerakan higroskopis ketika daunnya menutup dalam kondisi kelembapan rendah. Ini adalah mekanisme untuk mengurangi kehilangan air.

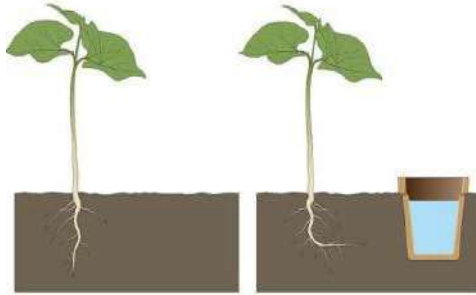


Gambar 8.5. Membuka dan menutupnya daun putri malu

Sumber: <https://images.app.goo.gl/NNkkbaKUctRo3GCX6>

3. Pergerakan Akar

Akar tanaman juga menunjukkan pergerakan higroskopis. Saat tanah menjadi kering, akar dapat beradaptasi dengan mengubah arah tumbuhnya untuk mencari sumber air.



Gambar 8.6. Pembelokan akar menuju sumber air

Sumber: <https://images.app.goo.gl/s5EMvz1hgq7GoTGZ8>

Pergerakan higroskopis merupakan fenomena penting dalam dunia tumbuhan yang menunjukkan bagaimana tumbuhan dapat beradaptasi terhadap perubahan lingkungan, khususnya yang berkaitan dengan ketersediaan air. Contoh seperti pembukaan polong dan pergerakan daun pada tanaman kecil menggambarkan bagaimana perubahan kadar air dapat mempengaruhi pergerakan bagian tanaman.

8.2.3 Gerak Tropisme

Gerak tropisme merupakan gerak tumbuhan atau bagian tumbuhan yang arahnya dipengaruhi oleh datangnya rangsangan. Gerak tropisme ini dibedakan menjadi gerak fototropisme atau gerak heliotropisme, gerak gravitropisme atau gerak geotropisme, gerak tigotropisme, gerak hidrotropisme, dan gerak kemotropisme (Lukyani, 2021).

1. Fototropisme atau heliotropisme

Gerak fototropisme atau heliotropisme merupakan pergerakan tumbuhan yang disebabkan oleh rangsangan berupa cahaya matahari, suatu adaptasi tumbuhan mengarahkan tajuknya ke arah matahari untuk proses fotosintesis. Tumbuhan mengandung hormon auksin yang

berperan memicu pertumbuhan sel pada bagian tumbuhan yang jauh dari cahaya, sehingga akan tumbuh lebih cepat menuju cahaya. Ini membantu tanaman memaksimalkan fotosintesis. Contoh fototropisme atau heliotropisme pada tumbuhan adalah perputaran pucuk atau ujung pucuk ke arah matahari.



Gambar 8.7. Membeloknya pucuk tunas ke arah matahari
Sumber: <https://images.app.goo.gl/ieaGNLMSY3TPiMZw6>

2. Gravitropisme atau geotropisme:

Gravitropisme atau geotropisme merupakan pergerakan yang terjadi sebagai respons terhadap gravitasi bumi. Akar tanaman umumnya tumbuh ke bawah (gravitropisme positif), sedangkan batang tumbuh ke atas (gravitropisme negatif). Hal ini juga dipengaruhi oleh distribusi auksin dalam tanaman.



Gambar 8.8. Pertumbuhan akar ke arah bawah
Sumber: <https://images.app.goo.gl/HvhiLditJkoekni79>

3. Tigmotropisme

Gerak tigmotropisme merupakan gerak tropisme yang disebabkan oleh rangsangan berupa kontak dengan benda yang lebih keras, misalnya gerak tumbuhan merambat. Jika sulur tanaman bersentuhan dengan benda keras seperti tiang kayu, maka akan terjadi kontak sehingga sulur akan melingkari kayu.



Gambar 8.9. Lilitan sulur pada tonggak kayu

Sumber: <https://images.app.goo.gl/yihyFqdeu6uJ4VWv9>

4. Hidrotropisme

Hidrotropisme merupakan gerak tropisme yang disebabkan oleh rangsangan berupa air. Contohnya adalah pergerakan akar tanaman yang selalu bergerak menuju tempat lembab.

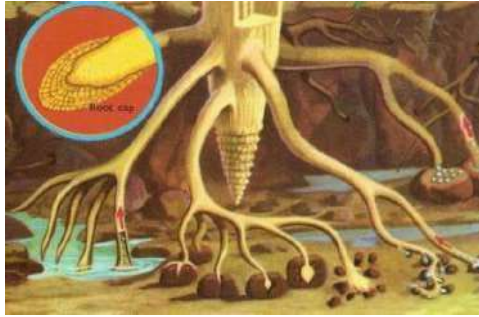


Gambar 8.10. Pertumbuhan akar kearah adanya air

Sumber: <https://images.app.goo.gl/YmNZozPU2M7yhaik9>

5. Kemotropisme

Kemotropisme merupakan gerak tropisme yang disebabkan oleh rangsangan berupa zat-zat kimia, misalnya gerak akar menuju unsur hara atau pupuk yang ada didalam tanah.



Gambar 8.11. Gerak akar ketempat adanya unsur hara
Sumber: <https://images.app.goo.gl/Zwpm4RVL7XwQzxBP7>

8.2.4 Gerakan Nasti

Gerak nasti merupakan gerak pada tumbuhan yang arahnya tidak bergantung pada arah rangsangan melainkan ditentukan oleh tumbuhan itu sendiri. Contohnya adalah gerak bunga yang membuka dan menutup pada siang dan malam hari (niktinasti) atau gerak daun mimosa yang menutup bila disentuh (seismonasti/tigmonasti). Pergerakan ini biasanya disebabkan oleh perubahan turgor sel, yaitu tekanan air pada dinding sel tumbuhan. Menurut Atillah dan Serafica (2023), gerakan nasti terbagi menjadi 6 jenis, yaitu:

1. Niktinasti

Niktinasti merupakan gerakan nasti yang disebabkan oleh kondisi gelap, namun selain disebabkan oleh kondisi gelap, gerakan ini juga dapat terjadi karena adanya perubahan tekanan turgor pada sendi tumbuhan. Contoh gerak niktinasti adalah gerak daun pohon turi yang menutup daunnya pada malam hari hingga dini hari.



Gambar 8.12. Gerak tidur daun pohon turi

Sumber: <https://images.app.goo.gl/uQb7bZtZZayQnsFF9>

2. Fotonasti

Fotonasti merupakan gerakan pada tumbuhan yang disebabkan oleh rangsangan sinar matahari. Contoh gerak fotonasti pada tumbuhan adalah bunga jam sembilan yang mekar sekitar jam sembilan dan bunga jam empat (*Mirabilis jalapa*) yang mekar pada sore hari dan menutup keesokan paginya.



Gambar 8.13. Gerak fotonasti pada bunga pukul empat

Sumber: <https://images.app.goo.gl/fNX6sja8uKzfaikb6>,
<https://images.app.goo.gl/T5n6YQDHKS4Tn2v47>

3. Tigmonasti

Tigmonasti adalah gerakan nasti yang disebabkan oleh rangsangan mekanis berupa sentuhan atau tekanan. Gerakan tigmonasti disebut juga dengan gerakan seismonasti. Contoh gerak tigmonasti pada tumbuhan adalah gerak menutupnya daun *Mimosa Pudica* bila disentuh. Mekanisme pergerakan ini juga disebabkan oleh pengaruh perubahan tekanan turgor sel pada ruas daun.



Gambar 8.14. Mengatupnya daun Mimosa Pudica akibat sentuhan

Sumber: <https://images.app.goo.gl/J66MLxh5EfVyRErt7>

4. Termonasti

Termonasti merupakan gerakan nasti yang disebabkan oleh rangsangan termal. Yang termasuk gerak termonasti pada tumbuhan adalah mekar dan mengatupnya bunga tulip bila suhu udara sesuai. Bunga Tulip akan mekar jika suhu tiba-tiba naik dan akan menutup jika suhu turun.



Gambar 8.15. Mekar dan menutupnya bunga tulip akibat perubahan suhu

Sumber: <https://images.app.goo.gl/Yco9GvFgYpzzzNPYA>

5. Haptonasti

Haptonasti merupakan gerakan nasti yang terjadi pada tumbuhan pemakan serangga yang disebabkan oleh kontak serangga. Contoh haptonasti adalah tertutupnya daun tanaman kantong semar dan venus flytrap bila disentuh serangga kecil. Serangga yang hinggap di permukaan daun akan terperangkap dan tidak dapat melarikan diri.

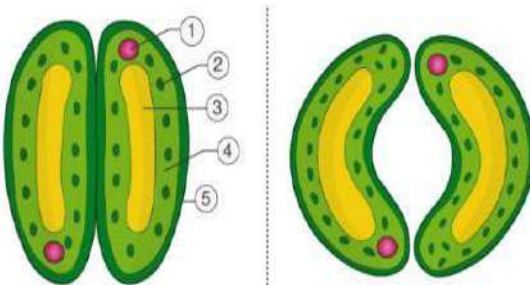


Gambar 8.16. Menutupnya venus flytrap akibat kontak serangan

Sumber: <https://images.app.goo.gl/MpHjZSm5VQoeboM76>

6. Nasti Kompleks

Nasti kompleks merupakan gerakan Nasti yang disebabkan oleh beberapa rangsangan sekaligus, contoh gerak nasti kompleks adalah gerak membuka dan menutupnya stomata. Kompleksnya pergerakan nasti pada saat membuka dan menutup stomata disebabkan oleh beberapa rangsangan, antara lain karena rangsangan cahaya, bahan kimia, dan air (Pak Guru, 2020; Adzkiyyah, 2020).



Gambar 8.17. Membuka dan menutupnya stomata

<https://images.app.goo.gl/jXj8CrUU71RDg6ox6>

8.2.5 Gerak Taksis

Gerak taksi merupakan gerak seluruh bagian tumbuhan yang arahnya dipengaruhi oleh sumber rangsangan. Menurut Edukasi (2021), gerak taksis dibedakan atas 3 macam yaitu gerak kemotaksis, gerak fototaksis dan gerak galvanotaksis sedangkan menurut Liputan6 (2024), berdasarkan stimulusnya gerak taksis

dibedakan atas kemotaksis, fototaksis, galvanotaksis atau elektrotaksis, termotaksis, dan geotaksis.

1. Kemotaksis

Kemotaksis pada tumbuhan adalah gerakan atau pergerakan bagian dari sel tumbuhan atau organisme tumbuhan kecil yang dipengaruhi oleh rangsangan berupa zat kimia. Gerak ini terjadi karena adanya respons terhadap gradien konsentrasi senyawa kimia tertentu di lingkungan. Gerak kemotaksis meliputi kemotaksis positif, terjadi ketika organisme bergerak menuju konsentrasi bahan kimia yang lebih tinggi, sedangkan kemotaksis negatif terjadi ketika organisme menjauh dari konsentrasi bahan kimia tersebut. Beberapa contoh gerakan kemotaksis antara lain:

- a. Pergerakan bakteri Engelmann menuju kloroplas.
- b. Pergerakan spermatozoid menuju protein dan gula.
- c. Pergerakan bakteri oksigen menuju oksigen
- d. Pergerakan spermatozoid tumbuhan lumut dan pakis.
- e. Pergerakan akar menuju ion nutrisi

Spermatozoid (sel kelamin jantan) dari tumbuhan lumut dan pakis bergerak menuju ovum (sel kelamin betina) yang menghasilkan senyawa kimia tertentu seperti asam malat. Zat kimia ini menarik spermatozoid sehingga memungkinkan fertilisasi terjadi.

Meskipun akar tumbuhan bergerak dalam mekanisme geotropisme, akar juga dapat merespons zat kimia di tanah seperti ion nutrisi (misalnya nitrogen dan fosfor) sehingga dapat dianggap memiliki aspek kemotaksis positif secara lokal.



Gambar 8.18. Gerak spermatozoid

Sumber: <https://images.app.goo.gl/c382PJw7q6AX9ASv7>

2. Fototaksis

Fototaksis pada tumbuhan adalah gerakan organisme atau bagian dari sel tumbuhan yang dipengaruhi oleh rangsangan berupa cahaya. Gerak ini melibatkan respons terhadap intensitas atau arah sumber cahaya dan biasanya terjadi pada organisme mikroskopis atau struktur tertentu dalam tumbuhan. Gerak ini dibedakan atas fototaksis positif yang terjadi ketika organisme bergerak menuju cahaya, dan fototaksis negatif yang terjadi ketika organisme menjauhi cahaya.

Contoh gerak fototaksis: (1). Pergerakan pada alga mikroskopis yang dimungkinkan karena adanya flagela yang digerakan oleh energi metabolisme dimana sel-sel bergerak menuju cahaya (fototaksis positif) untuk melakukan fotosintesis. (2). Gerak fototaksis pada *Euglena*, yaitu organisme bersel tunggal yang mengandung klorofil. *Euglena* akan bergerak menuju sumber cahaya untuk melakukan fotosintesis. Selain itu, kloroplas pada sel tumbuhan juga menunjukkan fototaksis dengan bergerak menuju sisi sel yang terkena cahaya untuk mengoptimalkan penyerapan energi matahari. (3). Pada tumbuhan tertentu seperti lumut atau pakis, sel gamet atau spora yang memiliki struktur penggerak dapat bergerak menuju cahaya untuk meningkatkan peluang keberhasilan reproduksi.



Gambar 8.19. Gerak kloroplas ke sisi sel yang memperoleh cahaya

Sumber: <https://images.app.goo.gl/K97SwnnCYGrS4EzL9>

Tumbuhan fototaksis umumnya memiliki organ atau struktur khusus yang peka terhadap cahaya, seperti batang, daun, atau akar. Pergerakan fototaksis tumbuhan berperan dalam mencari cahaya dalam proses fotosintesis (Suhendar, 2023)

3. Galvanotaksis atau elektrotaksis

Galvanotaksis pada tumbuhan adalah gerakan sel atau organisme tumbuhan mikroskopis yang dipengaruhi oleh medan listrik. Gerakan ini terjadi karena adanya respons terhadap gradien atau arah medan listrik, baik bergerak menuju kutub positif (anoda) atau kutub negatif (katoda). Fenomena ini sering disebut juga gerak **elektrotaksis**. Deteksi medan listrik pada galvanotaksis melalui sel yang memiliki reseptor ionik atau protein membran yang sensitif terhadap perubahan medan listrik.

Contoh gerak galvanotaksis: (1). Spermatozoid yang merupakan sel gamet jantan pada tumbuhan lumut dan pakis, dapat bergerak mengikuti medan listrik yang dihasilkan secara alami oleh jaringan betina. Hal ini membantu spermatozoid mencapai ovum untuk proses fertilisasi. (2). Jenis alga seperti *Chlamydomonas* menunjukkan pergerakan yang dipengaruhi

oleh medan listrik, yang memungkinkan mereka menyesuaikan lokasi dalam lingkungan akuatik.

4. Termotaksis

Termotaksis adalah gerak yang dipengaruhi oleh rangsangan suhu. Pada tanaman, termotaksis biasanya melibatkan gerakan organ atau sel tanaman tertentu untuk merespons perubahan suhu di sekitarnya. Meskipun tanaman tidak bergerak secara aktif seperti hewan, respons terhadap suhu terjadi melalui mekanisme adaptif dan perubahan posisi sel atau struktur tertentu, seperti kloroplas atau stomata. Gerak ini dibedakan atas **termotaksis positif**, yakni gerak atau respons menuju sumber panas atau suhu yang lebih tinggi, dan **termotaksis negatif**, yakni gerak atau respons menjauhi sumber panas atau suhu yang lebih tinggi.

Contoh gerak termotaksis pada tanaman diantaranya adalah: (1). gerak membuka dan menutupnya stomata, saat suhu tinggi stomata sering menutup untuk mencegah terjadinya kehilangan air akibat respirasi, (2). Suhu memengaruhi pertumbuhan akar dan biji, suhu optimum untuk pertumbuhan akar adalah 20-30°C dan untuk benih 15-30°C, (3). pergerakan kloroplas dalam sel daun, pada suhu yang terlalu tinggi kloroplas akan bergerak untuk menghindari kerusakan akibat ekstrimnya suhu.

Dalam mekanisme fisiologis, gerak termotaksis ini memiliki beberapa fungsi seperti membantu tanaman untuk bertahan dalam lingkungan dengan suhu yang selalu berubah, memastikan proses metabolisme seperti fotosintesis dan respirasi yang terjadi pada suhu optimal, meningkatkan kemampuan adaptasi tanaman terhadap kemungkinan terjadinya perubahan iklim.

5. Geotaksis

Geotaksis adalah gerak yang dipengaruhi oleh gravitasi. Pada tanaman, istilah ini sering digunakan untuk merujuk pada gerak seluler tertentu, seperti pada sel sperma tumbuhan lumut

atau pakis, yang bergerak menuju atau menjauhi sumber gravitasi. Untuk respons gravitasi yang lebih umum pada bagian tubuh tanaman, istilah yang lebih sering digunakan adalah *geotropisme* atau *gravitropisme*. Gerak geotaksis dibedakan menjadi geotaksis positif jika gerakannya menuju arah gravitasi (kebawah), dan geotaksis negatif jika gerakannya berlawanan arah gravitasi (keatas).

Contoh gerak geotaksis diantaranya pergerakan sel sperma (lumut dan pakis) menuju bagian yang lebih rendah untuk mencapai sel telur (geotaksis positif), dan beberapa sel atau organ yang bergerak berlawanan arah gravitasi.

Geotaksis merupakan gerak aktif yang melibatkan respons terhadap gravitasi pada sel atau organisme tertentu dalam tumbuhan. Walaupun jarang diamati pada tanaman besar, geotaksis memiliki peran penting dalam tahap gamet pada tumbuhan lumut, pakis, dan organisme sejenis. Hal ini membedakannya dari geotropisme, yang lebih sering diamati pada organ tanaman seperti akar dan batang.

8.3 Aktivitas Transpirasi Terkait Gerakan pada Tanaman

Proses transpirasi adalah keluarnya uap air dari permukaan daun melalui stomata atau melalui kutikula. Proses ini tidak hanya penting untuk mengatur suhu tanaman, tetapi juga menciptakan daya isap yang membantu menarik air dan unsur hara dari akar ke bagian atas tanaman. Transpirasi berperan dalam mengatur fisiologi tanaman dan mempengaruhi pertumbuhan (Silaen, 2021). Pada permulaan berlangsungnya, transpirasi melibatkan mekanisme fisiologis yang meliputi hormon tumbuhan dan perubahan turgor seluler. Transpirasi juga bekerja dengan mengatur suhu tanaman, menyerap dan mengangkut unsur hara, serta membantu mengangkut air dari akar ke daun. Kaitan antara transpirasi dan pergerakan tumbuhan melalui mekanisme yang disebut gerakan hidronastik. Berikut penjelasan hubungan transpirasi dengan pergerakan tumbuhan:

1. Pergerakan stomata

Transpirasi dikendalikan oleh gerakan membuka dan menutup stomata. Ketika tanaman kehilangan banyak air karena transpirasi yang tinggi, sel penjaga stomata kehilangan tekanan turgornya dan menyebabkan stomata menutup untuk mencegah kehilangan air lebih lanjut. Sebaliknya, ketika air mencukupi, sel penjaga menyerap air, tekanan turgor meningkat, dan stomata terbuka, hal ini memungkinkan transpirasi dan penyerapan karbon dioksida untuk fotosintesis.

2. Gerak turgor

Transpirasi berperan dalam menjaga tekanan turgor pada sel tumbuhan. Ketika air menguap dari daun, tekanan air dalam jaringan tanaman berkurang sehingga menimbulkan gaya tarik (tarikan transpirasi) yang menarik air dari akar ke puncak tanaman melalui xilem. Tekanan turgor ini sangat penting dalam menunjang struktur dan kedudukan daun dan batang, sehingga mempengaruhi orientasi dan arah pertumbuhan tanaman.

3. Pengaruh pergerakan daun

Pada beberapa tumbuhan, aktivitas transpirasi mempengaruhi pergerakan niktinasti (gerakan tidur), yaitu pergerakan daun yang dipengaruhi oleh siklus siang dan malam. Ketika transpirasi lebih aktif pada siang hari, turgor sel tertentu meningkat sehingga menyebabkan daun terbuka untuk fotosintesis. Pada malam hari transpirasi menurun, turgor menurun, dan daun menutup untuk mengurangi kehilangan air.

4. Heliotropisme/Fototropisme

Meski gerakan ini lebih dipengaruhi oleh cahaya, transpirasi juga berperan dalam respons tumbuhan terhadap arah cahaya. Saat transpirasi tinggi, air lebih cepat hilang dari sisi daun yang terkena cahaya langsung, sehingga daun akan bergerak sedikit untuk memaksimalkan atau mengurangi paparan cahaya guna mengendalikan kehilangan air.

Aktivitas transpirasi yang dikendalikan oleh faktor internal dan eksternal tanaman sangat penting untuk menjamin keseimbangan air dan memaksimalkan efisiensi fotosintesis, pertumbuhan dan adaptasi tanaman terhadap lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Atillah R, Serafica G. 2023. Pengertian Gerak Nasti pada Tumbuhan beserta Jenis dan Contohnya. [Internet]. Tersedia pada <https://bit.ly/Geraknasti>
- Adzkiyyah A. 2020. Macam-macam Gerakan pada Tumbuhan. [Internet]. Tersedia pada <https://www.utakatikotak.com/Macam-macam-Gerakan-Pada-Tumbuhan/kongkow/detail/18835>
- Edukasi H. 2021. Gerak Tasis pada Tumbuhan: Jenis dan Contohnya. [Internet] tersedia pada <https://www.youtube.com/watch?v=nQyYk8x9Nc>
- Eirin G. 2021. Sistem Gerak pada Tumbuhan: Endonom, Higroskopis, dan Esionom. [Internet] Tersedia pada <https://bit.ly/Keluarbunga>
- Imsspada. 2024. Komponen Penyusun Sel Tumbuhan. [Internet] Tersedia pada https://lmsspada.kemdikbud.go.id/pluginfile.php/540158/mod_forum/intro/Materi%20Sel.pdf
- Liputan6. 2024. Taksis Adalah Gerakan Tumbuhan yang Dipengaruhi Rangsangan. [Internet] Tersedia pada <https://www.liputan6.com/feeds/read/5775436/taksis-adalah-gerak-tumbuhan-yang-dipengaruhi-rangsangan-simak-penjelasan>
- Lukyani L, 2021. Jenis-Jenis Gerak Tropisme Tumbuhan. [internet]. Tersedia pada <https://www.kompas.com/sains/read/2021/12/10/173200423/jenis-jenis-gerak-tropisme-tumbuhan>
- Muallit. 2024. Sistem Gerak Pada Tumbuhan: Pengertian, Jenis dan Contohnya. [Internet] Tersedia pada <https://an-nur.ac.id/blog/sistem-gerak-pada-tumbuhan-pengertian-jenis-dan-contohnya.html>
- Pak Guru, 2020. Gerak Nasti pada Tumbuhan. [Internet] Tersedia pada <https://www.youtube.com/watch?v=LBubf23KwtA>

- Ragam I. 2023. 10 Contoh Gerak Taksis Pada Tumbuhan [Internet] Tersedia pada <https://kumparan.com/ragam-info/10-contoh-gerak-taksis-pada-tumbuhan-21Qg4tn4oe1>
- Silaen S. 2021. Pengaruh Transpirasi Tumbuhan dan Komponen Diddalamnya. J. Agroprimatech 5(1) p 14-20.

BAB 9

MEKANISME DAN REGULASI PERTUMBUHAN TANAMAN

Oleh Muhammad Ridhwan

9.1 Pendahuluan

Pertumbuhan tanaman merupakan salah satu fenomena biologis yang paling menakjubkan dalam dunia makhluk hidup. Proses ini melibatkan serangkaian mekanisme kompleks yang dikendalikan oleh berbagai faktor genetik, fisiologis, dan lingkungan. Sebagai suatu organisme, tanaman memiliki kemampuan luar biasa untuk beradaptasi dan berkembang dengan memanfaatkan sumber daya yang tersedia di lingkungan sekitarnya, seperti cahaya, air, dan nutrisi.

Bab ini akan membahas secara mendalam mekanisme-mekanisme utama yang terlibat dalam pertumbuhan tanaman serta regulasi yang mengatur proses-proses tersebut. Dari tahap pembelahan sel hingga diferensiasi jaringan, setiap langkah dalam perjalanan pertumbuhan tanaman menawarkan wawasan penting mengenai bagaimana kehidupan berlangsung dan beradaptasi terhadap kondisi yang terus berubah.

Selain itu, pembahasan akan mencakup peran hormon tanaman, seperti auksin, giberelin, dan sitokinin, yang bertindak sebagai regulator utama dalam mengendalikan pola dan kecepatan pertumbuhan. Faktor-faktor eksternal seperti cahaya, suhu, dan pola nutrisi juga akan diuraikan untuk memahami bagaimana interaksi antara lingkungan dan genetik memengaruhi perkembangan tanaman secara keseluruhan. Dengan demikian, bab ini tidak hanya bertujuan memberikan pengetahuan dasar, tetapi juga wawasan mengenai bagaimana proses ini dapat dimanfaatkan untuk mendukung kemajuan di bidang pertanian dan teknologi hayati.

9.2 Mekanisme Pertumbuhan Tanaman

Pertumbuhan tanaman dapat dibagi menjadi tiga tahapan utama yaitu pembelahan sel, pemanjangan sel, dan diffrensiasi sel:

1. Pembelahan Sel (Mitosis)

Pertumbuhan tanaman adalah proses dimana tanaman mengalami peningkatan ukuran, volume, dan struktur yang lebih kompleks. Salah satu mekanisme utama dalam pertumbuhan ini adalah pembelahan sel (mitosis). Mitosis merupakan bentuk pembelahan sel yang berfungsi untuk menghasilkan dua sel anak dengan jumlah kromosom yang sama dengan sel induknya. Proses ini sangat penting bagi pertumbuhan dan perkembangan tanaman karena memungkinkan pembentukan jaringan baru (Stahl-Meyer et al., 2022).

Mitosis terjadi pada jaringan meristematik, yaitu jaringan aktif yang terdapat di bagian ujung akar, ujung batang, dan bagian lain yang sedang tumbuh. Meristem adalah pusat aktivitas mitosis pada tanaman, di mana sel-selnya terus-menerus mengalami pembelahan untuk menghasilkan lebih banyak sel baru. Hal ini yang membuat tanaman dapat terus melakukan pertumbuhan panjang (pertumbuhan primer) dan pada area tertentu juga memungkinkan pertumbuhan lebar (pertumbuhan sekunder).

Tahapan Mitosis pada Tanaman

Mitosis pada tanaman dibagi menjadi beberapa tahap (Khan Academy, 2019), yaitu:

- a. **Profase:** Pada tahap ini, kromosom mulai memadat dan menjadi lebih terlihat di bawah mikroskop. Nukleus (inti sel) mulai menghilang, dan spindle (benang gelendong) mulai terbentuk di dalam sel.
- b. **Metafase:** Kromosom tersusun rapi di sepanjang bidang ekuator sel atau yang disebut lempeng metafase. Spindle terhubung dengan kinetokor pada kromosom.
- c. **Anafase:** Kromatid yang berpasangan mulai ditarik oleh spindle ke kutub yang berlawanan. Tahap ini menyebabkan kromosom terpisah menjadi dua bagian yang sama.

- d. Telofase:** Membran inti mulai terbentuk kembali di sekitar kumpulan kromosom di setiap kutub, dan kromosom mulai mengendur menjadi kromatin. Akhirnya dua inti sel terbentuk.

Mitosis diikuti oleh sitokinesis, yaitu pembelahan sitoplasma, yang menghasilkan dua sel anak yang identik. Kedua sel anak ini memiliki jumlah kromosom yang sama dengan sel induk, memastikan bahwa semua sel baru yang terbentuk memiliki informasi genetik yang sama.

Pentingnya Mitosis dalam Pertumbuhan Tanaman

Mitosis memainkan peran penting dalam berbagai aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Beberapa fungsi utama mitosis (Contreras & Perea-Resa, 2024) adalah:

- a. Pertumbuhan Primer:** Pembelahan sel secara mitosis di jaringan meristem meningkatkan panjang tanaman. Hal ini terlihat pada pertumbuhan ujung akar dan pucuk batang.
- b. Pemulihan Jaringan:** Ketika jaringan tanaman mengalami kerusakan, mitosis membantu mengganti sel-sel yang hilang atau rusak oleh kerusakan fisik ataupun serangan patogen.
- c. Perkembangan Organ:** Proses perkembangan organ tanaman seperti daun, bunga, dan buah melibatkan pembelahan mitosis yang intensif untuk membentuk struktur kompleks yang berfungsi.

Dampak Mitosis pada Struktur Seluler

Setiap siklus mitosis yang sukses memastikan:

- a. Keseimbangan Genetik:** Informasi genetik yang sama diwariskan ke sel anak, sehingga mempertahankan keseragaman genetika di seluruh jaringan tanaman.
- b. Pengaturan Pembentukan Jaringan:** Sel hasil mitosis akan berbeda lebih lanjut melalui proses diferensiasi, menghasilkan berbagai tipe jaringan seperti epidermis, xilem, dan floem.

Proses ini sangat esensial karena menjaga kestabilan ekosistem dan memungkinkan pertumbuhan terprogram yang

sesuai dengan kebutuhan tanaman untuk bertahan hidup dan berkembang di lingkungannya.

2. Pemanjangan Sel

Pertumbuhan tanaman melalui pemanjangan sel merupakan salah satu mekanisme penting dalam perkembangan tanaman. Pemanjangan sel (*cell elongation*) terjadi ketika sel-sel tanaman meningkatkan volumenya tanpa pembelahan, memungkinkan tanaman untuk memperbesar ukuran organ-organ seperti batang, akar, dan daun.

Secara umum, proses pemanjangan sel erat kaitannya dengan tiga faktor utama: tekanan turgor, dinding sel, dan hormon tanaman seperti auksin. Tekanan turgor berasal dari air yang masuk ke dalam vakuola sel, menciptakan tekanan yang mendorong dinding sel untuk mengembang. Dinding sel yang fleksibel namun tangguh memungkinkan ekspansi ini tanpa menghancurkan struktur sel.

Salah satu hormon yang memainkan peran kunci adalah auksin. Auksin bertugas memodulasi sifat mekanis dinding sel, membuatnya lebih lentur sehingga dapat mengembang. Hormon ini juga merangsang aktivitas protein-protein tertentu, seperti ekspansin, yang memutuskan interaksi antara serat penyusun dinding sel agar sel lebih mudah merenggang. Dengan cara ini, auksin membantu mengatur pola pemanjangan sel di berbagai bagian tanaman.

Proses pemanjangan sel tidak hanya penting untuk pertumbuhan biasa, tetapi juga untuk respon tanaman terhadap rangsangan lingkungan, seperti cahaya dan gravitasi. Fenomena seperti tropisme, yaitu batang yang membengkok ke arah cahaya (fototropisme) atau akar yang tumbuh menjauh dari cahaya dan tunduk pada gravitasi (geotropisme), merupakan contoh proses yang melibatkan pemanjangan sel secara diferensial.

3. Diferensiasi Sel

Diferensiasi sel adalah proses di mana sel-sel yang belum memiliki fungsi spesifik (sel-sel meristem) berkembang menjadi sel-sel dengan struktur dan fungsi tertentu. Dalam konteks tanaman, diferensiasi ini sangat penting untuk pembentukan jaringan dan organ yang berbeda, seperti daun, batang, akar, bunga, dan buah. Proses ini memungkinkan tanaman untuk tumbuh, berkembang, dan bereproduksi secara optimal.

Sel meristem menjadi aktor utama dalam proses ini. Mereka terletak di area yang memungkinkan pertumbuhan aktif, seperti meristem apikal (ujung batang dan akar) dan meristem lateral (kambium). Ketika sel-sel meristem membelah, sebagian dari mereka tetap dalam keadaan yang tidak berdiferensiasi, sementara bagian lainnya mengalami diferensiasi untuk membentuk jaringan khusus, seperti epidermis, jaringan vaskular, atau parenkim.

Proses Diferensiasi Sel dalam Pertumbuhan Tanaman

Proses diferensiasi sel dalam pertumbuhan tanaman melibatkan beberapa langkah utama, yaitu:

- a. **Inisiasi:** Sel-sel meristem mulai mendapatkan sinyal untuk berdiferensiasi. Sinyal ini bisa berasal dari hormon tanaman, seperti auksin, sitokinin, gibberellin, serta faktor lingkungan.
- b. **Perubahan Genetik dan Sitoplasma:** Gen-gen tertentu diaktifkan untuk menghasilkan protein spesifik yang menentukan struktur dan fungsi sel. Selain itu, struktur sitoplasma juga mulai terbentuk sesuai tugas sel.
- c. **Formasi Jaringan:** Setelah berdiferensiasi, sel-sel bergabung membentuk jaringan seperti epidermis (pelindung), jaringan vaskular (pengangkutan nutrisi), dan jaringan pendukung (sklerenkim atau kolenkim).

Pentingnya Diferensiasi Sel dalam Pertumbuhan Tanaman

Diferensiasi sel memberikan kontribusi besar bagi keefisienan fungsi tanaman. Berikut adalah beberapa peran utamanya:

- a. **Pengangkutan Air dan Nutrisi:** Sel-sel diferensiasi membentuk jaringan xilem dan floem yang bertanggung jawab untuk mengangkut air, mineral, dan fotosintat ke seluruh bagian tanaman.
- b. **Melindungi dan Mendukung Struktur Tanaman:** Sel-sel epidermis yang berdiferensiasi melindungi tanaman dari kehilangan air dan serangan patogen. Selain itu, struktur seperti kolenkim dan sklerenkim memberikan kekuatan mekanis pada batang dan daun.
- c. **Fotosintesis dan Pertukaran Gas:** Jaringan palisade dan spons yang terbentuk dari diferensiasi di daun memungkinkan tanaman untuk melakukan fotosintesis secara maksimal dan mengelola pertukaran gas melalui stomata.
- d. **Perakaran dan Penyerapan Air:** Diferensiasi akar menghasilkan rambut akar, yang meningkatkan kapasitas penyerapan air dan nutrisi dari tanah.

Proses diferensiasi juga membantu tanaman beradaptasi dengan lingkungan sekitarnya, seperti tumbuh lebih kuat di tempat yang sering terpapar angin atau membentuk akar lebih dalam saat terjadi kekeringan.

9.3 Regulasi Pertumbuhan Tanaman

Regulasi pertumbuhan tanaman dikendalikan oleh faktor internal (hormon) dan faktor eksternal (lingkungan):

1. Faktor Internal: Hormon Tanaman

Hormon tanaman adalah molekul kecil yang mengatur pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Berikut adalah lima hormon utama:

a. Auksin

Auksin adalah kelompok hormon tanaman yang pertama kali ditemukan oleh para ilmuwan ketika mereka mempelajari bagaimana tanaman merespons cahaya, proses yang disebut fototropisme. Auksin terutama diproduksi di area meristem apikal, seperti pucuk tanaman dan akar muda, yang merupakan pusat utama

pertumbuhan tanaman. Bentuk auksin yang paling umum dan aktif secara fisiologis adalah Indole Acetic Acid (IAA).

Fungsi Utama Auksin

Auksin bertindak sebagai regulator utama pertumbuhan tanaman, dengan berbagai fungsi (Taiz et al., 2023) seperti:

- 1) Pemanjangan Sel:** Auksin merangsang pemanjangan sel, terutama di bagian tertentu pada tanaman, seperti batang dan tangkai daun. Hal ini penting untuk pertumbuhan tinggi tanaman.
- 2) Dominansi Apikal:** Auksin mengontrol dominansi apikal, yaitu kecenderungan tanaman untuk memprioritaskan pertumbuhan pada pucuk utama dibandingkan dengan tunas lateral. Produksi auksin yang tinggi di pucuk apikal menghambat perkembangan tunas samping.
- 3) Pembentukan Akar:** Auksin penting dalam proses perakaran. Sering kali digunakan dalam pertanian untuk mempercepat pembentukan akar pada stek tanaman.
- 4) Respons terhadap Gravitasi dan Cahaya:** Auksin bertanggung jawab atas tropisme, seperti fototropisme (respons terhadap cahaya) dan gravitropisme (respons terhadap gravitasi). Auksin mendistribusikan dirinya secara tidak merata dalam jaringan tanaman, menyebabkan pembengkokan batang atau akar menuju atau menjauhi stimulus tertentu.

Setelah memahami peran utamanya, mari kita bahas lebih mendalam tentang mekanisme kerja auksin pada bagian sel tanaman.

Cara Kerja Auksin pada Tingkat Sel

Hormon auksin bekerja melalui mekanisme kompleks yang melibatkan perubahan ekspresi gen dan modifikasi fisik pada sel tanaman (Sosnowski et al., 2023). Berikut adalah cara kerjanya secara lebih mendalam:

Pemanjangan Sel Melalui Aktivasi Protein Pemompa Proton (H^+ -ATPase):

Auksin memicu aktivitas pompa proton pada membran plasma sel tanaman. Proton yang dihasilkan menurunkan pH di dinding sel, membuat area ini menjadi lebih asam. Kondisi ini mengaktifkan enzim yang dikenal sebagai expansin. Expansin membantu melonggarkan struktur dinding sel dengan memutuskan ikatan antara serat selulosa. Akibatnya, sel menjadi lebih meregang karena meningkatnya tekanan turgor internal.

1) Pengaturan Ekspresi Gen:

Auksin memengaruhi faktor transkripsi dan gen target tertentu, seperti gen yang berhubungan dengan hormon pertumbuhan. Misalnya, auksin memicu gen dalam keluarga SAUR, GH3, dan AUX/IAA, yang semuanya terlibat dalam proses pengaturan perkembangan tanaman. Aktivasi gen ini mendukung pertumbuhan sel dan diferensiasi jaringan.

2) Distribusi yang Asimetris:

Salah satu karakter unik auksin adalah distribusinya yang tidak merata, yang berkontribusi pada tropisme. Ketika tanaman terkena rangsangan cahaya dari satu sisi, auksin terkonsentrasi di sisi bayangan batang. Hal ini menyebabkan sel-sel di sisi itu meregang lebih banyak, sehingga batang membelok ke arah cahaya (fototropisme).

Peran Lain dalam Pertumbuhan

Selain berperan aktif dalam pemanjangan sel dan tropisme, auksin juga memediasi sejumlah proses perkembangan lainnya, seperti:

- 1) Pembentukan dan Pola Vaskular:** membantu dalam penentuan pola jaringan pengangkut seperti xilem dan floem.
- 2) Partenokarpi:** memicu pertumbuhan buah tanpa pembuahan, yang berguna dalam produksi buah-buah tertentu.

3) Pertahanan Tanaman: Auksin juga terlibat dalam respons terhadap tekanan lingkungan, seperti luka atau infeksi patogen.

Auksin benar-benar hormon multitasking yang memberikan fleksibilitas besar pada tanaman untuk tumbuh dan beradaptasi dengan lingkungannya.

b. Giberelin

Hormon giberelin adalah salah satu kelompok hormon tumbuhan yang memiliki peran penting dalam mengatur berbagai proses pertumbuhan dan perkembangan pada tanaman. Giberelin ditemukan pertama kali dalam penelitian terhadap jamur *Gibberella fujikuroi*, yang menghasilkan senyawa yang menyebabkan pertumbuhan tanaman padi menjadi tidak biasa (terlalu tinggi atau etiolasi). Saat ini, lebih dari 100 jenis giberelin telah diidentifikasi di berbagai jenis tanaman.

Mekanisme Kerja Giberelin

Giberelin bekerja dengan merangsang ekspresi gen tertentu di dalam sel tanaman yang bertanggung jawab atas pertumbuhan (Taiz et al., 2023). Pada umumnya, hormon ini memengaruhi aktivitas pembelahan sel, perpanjangan sel, dan diferensiasi sel. Produksi giberelin biasanya terjadi di bagian-bagian tanaman seperti daun muda, akar, dan biji yang sedang berkembang.

Mari kita bahas beberapa peran utama hormon giberelin dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman:

1) Peran dalam Perkecambahan Biji

Giberelin memiliki peran yang sangat penting dalam proses perkecambahan biji. Saat biji menyerap air (proses imbibisi), jaringan embrio mulai memproduksi giberelin, yang kemudian merangsang produksi enzim seperti amilase. Enzim ini bertugas mengubah cadangan pati dalam biji menjadi gula sederhana yang

dapat digunakan oleh embrio untuk pertumbuhan awal.

2) Meningkatkan Pertumbuhan Batang

Hormon giberelin mendorong pemanjangan batang dengan cara memperbesar ukuran sel-sel di bagian tertentu tanaman. Hal ini sangat terlihat pada jenis tanaman dwimutasi kerdil; ketika diberi giberelin, tanaman tersebut mampu tumbuh lebih tinggi dari biasanya. Fenomena ini sering dimanfaatkan dalam bidang agronomi untuk meningkatkan hasil produksi tanaman tertentu.

3) Pembentukan Bunga dan Buah

Giberelin juga berperan dalam induksi pembungaan pada beberapa spesies tanaman, terutama tanaman yang membutuhkan kondisi spesifik seperti lama cahaya tertentu (fotoperiodisme). Tidak hanya itu, giberelin dapat meningkatkan jumlah dan kualitas buah dengan cara memperbesar ukuran buah atau mencegah terbentuknya biji (partenokarpi). Contohnya adalah penggunaan giberelin pada anggur tanpa biji untuk meningkatkan ukuran buah.

4) Mengatasi Dormansi

Beberapa tanaman memiliki mekanisme dormansi, terutama pada bagian tunas atau biji, untuk bertahan selama kondisi lingkungan yang tidak mendukung. Giberelin dapat memecahkan dormansi dengan cara menginduksi enzim yang memecah cadangan makanan serta merangsang pertumbuhan tunas dan akar.

5) Pengaturan Pembentukan Struktur Tanaman

Giberelin memengaruhi pembentukan beberapa organ tanaman seperti daun, bunga, dan akar. Selain itu, hormon ini juga memiliki peran dalam proses bolting, yaitu pemanjangan cepat batang pada tanaman berbunga, terutama pada jenis tanaman dengan siklus hidup biennial seperti wortel atau kubis, setelah melewati masa dingin.

c. Sitokinin

Hormon sitokinin adalah salah satu dari lima kelompok utama hormon tanaman yang berperan penting dalam pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Sitokinin pertama kali ditemukan pada tahun 1950-an dan sejak itu telah menjadi subjek penelitian yang luas dalam dunia biologi tumbuhan. Hormon ini terutama berfungsi merangsang pembelahan sel (sitokinesis), serta memengaruhi berbagai proses fisiologis dan morfologis dalam tanaman.

Sitokinin sebagian besar ditemukan dalam jaringan tanaman yang sedang tumbuh aktif, seperti akar, biji yang sedang bertunas, dan daerah meristematik. Dalam daun dan batang, hormon ini ikut terlibat dalam mempertahankan dominansi apikal dan mencegah penuaan daun (*senescence*), yang berarti bahwa sitokinin membantu tanaman menjaga daun tetap hijau lebih lama dengan memperlambat degradasi klorofil.

Selain itu, sitokinin bekerja dalam hubungan erat dengan hormon lainnya, seperti auksin, untuk mengatur pembelahan dan diferensiasi sel. Misalnya, keseimbangan antara sitokinin dan auksin memainkan peran penting dalam pembentukan akar dan tunas. Jika kadar sitokinin lebih tinggi dibanding auksin dalam kultur jaringan, maka akan terbentuk tunas. Sebaliknya, jika auksin lebih dominan, akan terbentuk akar.

Selain perannya dalam pembelahan sel dan metabolisme klorofil, sitokinin juga berfungsi dalam pengangkutan nutrisi dan penyediaan energi ke bagian tanaman yang sedang berkembang. Hormon ini membantu mengatur pembagian hasil fotosintesis dari daun ke jaringan lain, seperti buah atau umbi, yang membutuhkan energi lebih untuk pertumbuhan (Waidmann et al., 2019).

d. Asam Absisat (ABA)

Hormon asam absisat (ABA) adalah salah satu hormon tanaman yang memiliki peran penting dalam berbagai aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Hormon ini sering dikenal sebagai "hormon stres" karena keterlibatannya dalam respons tanaman terhadap berbagai tekanan lingkungan seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Selain itu, ABA juga mengatur beberapa proses fisiologis, seperti dormansi biji dan pengaturan stomata (Damour et al., 2010).

Peran Utama Asam Absisat dalam Tanaman

- 1) Dormansi Biji:** ABA berperan penting dalam mendorong dormansi biji, yaitu suatu kondisi di mana biji tidak berkecambah meskipun berada dalam kondisi lingkungan yang mendukung. Hormon ini membantu tanaman dalam mengatasi kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan dengan mencegah perkecambahan yang prematur.
- 2) Penutupan Stomata:** Dalam kondisi stres air, seperti kekeringan, ABA memicu penutupan stomata pada daun. Penutupan stomata ini mengurangi laju transpirasi sehingga tanaman dapat mempertahankan cadangan air lebih lama.
- 3) Regulasi Pertumbuhan Tanaman:** ABA dapat menghambat pertumbuhan dalam kondisi stres. Hal ini membantu tanaman dalam mengalokasikan sumber daya untuk bertahan hidup daripada untuk pertumbuhan aktif.
- 4) Respon terhadap Stres Lingkungan:** Hormon ini memfasilitasi berbagai adaptasi tanaman terhadap kondisi lingkungan yang berat melalui regulasi gen-gen tertentu dan sinyal transduksi.

Mekanisme Kerja Asam Absisat

Mekanisme kerja asam absisat melibatkan sinyal transduksi yang kompleks. ABA pertama-tama akan

dikenali oleh reseptor protein yang ada pada membran sel. Pengikatan ABA dengan reseptor ini kemudian mengaktifkan serangkaian sinyal yang melibatkan protein kinase dan faktor transkripsi. Sinyal ini mengatur ekspresi gen-gen tertentu yang berkaitan dengan respons stres dan adaptasi tanaman.

Sebagai contoh, pada kondisi kekeringan, ABA menginduksi produksi protein-protein antioksidan yang membantu mengurangi kerusakan akibat stres oksidatif. Selain itu, gen yang mengkodekan protein penyimpanan air atau perlindungan membran juga diaktifkan oleh ABA untuk meningkatkan ketahanan tanaman.

Pengaruh ABA terhadap Pertumbuhan dan Produktivitas Tanaman

Walaupun ABA sangat penting untuk membantu tanaman bertahan di bawah kondisi stres, kelebihan hormon ini dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Sebagai contoh, kadar ABA yang terlalu tinggi dapat memperlambat proses fotosintesis akibat penutupan stomata yang berlebihan, sehingga mengurangi produktivitas tanaman.

Namun, penggunaan ABA secara terkendali memungkinkan aplikasi dalam bidang pertanian, seperti:

- 1) Meningkatkan Ketahanan Tanaman:** Dengan memicu respons stres lebih awal, ABA dapat meningkatkan kemampuan tanaman untuk bertahan dalam kondisi sulit seperti kekeringan.
- 2) Mengontrol Waktu Panen:** ABA dapat digunakan untuk mempercepat pematangan buah atau mengatur dormansi benih untuk kebutuhan tertentu.

Para peneliti juga sedang mengembangkan teknik untuk memodifikasi metabolisme ABA dalam tanaman guna meningkatkan efisiensinya tanpa memengaruhi pertumbuhan secara signifikan.

e. Etilen

Etilen adalah salah satu hormon tumbuhan utama yang memiliki peran penting dalam berbagai proses fisiologis dan pengaturan pertumbuhan tanaman. Meskipun sering kali disebut sebagai "hormon penuaan", etilen sebenarnya memiliki spektrum fungsi yang luas, mulai dari perkecambahan biji hingga pengguguran daun.

Fungsi Utama Etilen dalam Pertumbuhan Tanaman

1) Pemantauan Perkembangan dan Pematangan Buah

Etilen memainkan peran sentral dalam proses pematangan buah. Beberapa buah, seperti pisang, apel, dan tomat, dikenal sebagai buah klimakterik yang membutuhkan etilen dalam jumlah besar untuk memulai dan mempercepat proses pematangan.

2) Pengguguran Daun dan Buah (Abscission)

Selama kondisi tertentu, seperti kemarau atau penuaan tanaman, etilen memediasi proses abscission, yaitu pelepasan daun atau buah dari tanaman induknya. Proses ini penting untuk efisiensi energi tanaman.

3) Respon terhadap Stres Lingkungan

Dalam kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan, seperti kekeringan, salinitas, atau serangan patogen, etilen membantu tanaman beradaptasi dengan memperkuat respons pertahanan dan mengatur pertumbuhan.

4) Penghambatan atau Perubahan Pola Pertumbuhan

Etilen dapat menghambat elongasi batang, namun pada saat yang sama mendorong pelebaran batang dan pembesaran jaringan korteks. Hal ini sering terjadi dalam adaptasi tanaman terhadap hambatan mekanis di lingkungan sekitarnya, seperti batuan atau tanah keras.

Produksi Etilen di Tanaman

Etilen dihasilkan di hampir semua bagian tanaman, termasuk daun, batang, akar, bunga, dan buah. Proses biosintesisnya melibatkan beberapa tahap penting dengan asam amino metionin sebagai prekursor utama. Enzim-enzim seperti ACC sintase dan ACC oksidase turut berperan dalam produksi etilen.

Tingkat produksi etilen dapat dipengaruhi oleh faktor internal seperti fase perkembangan tanaman dan faktor eksternal seperti suhu, luka mekanis, atau serangan hama. Misalnya, luka pada jaringan tanaman dapat meningkatkan produksi etilen untuk mempercepat respons penyembuhan.

Mekanisme Kerja Etilen

Dalam sistem tanaman, etilen berfungsi sebagai hormon sinyal. Ketika dihasilkan, etilen akan difusi melalui sel-sel dan berikatan dengan reseptor etilen yang terdapat di membran sel tumbuhan. Aktivasi reseptor ini akan memulai serangkaian reaksi biokimia yang pada akhirnya memengaruhi ekspresi gen tertentu yang berkaitan dengan respons pertumbuhan atau adaptasi lingkungan.

Dampak Etilen terhadap Pertanian

Pemahaman tentang fungsi etilen telah dimanfaatkan secara luas dalam bidang pertanian dan hortikultura. Di antaranya adalah:

a. Pengendalian Pematangan Buah

Penggunaan gas etilen atau inhibitor produksinya memungkinkan pengendalian waktu pematangan buah dalam penyimpanan atau transportasi. Hal ini penting untuk menjaga kualitas buah saat sampai di pasar.

b. Pengelolaan Bunga Potong

Etilen dapat mempercepat layunya bunga potong. Oleh karena itu, penggunaan kimia penghambat kerja etilen, seperti silver thiosulfate (STS), sering diterapkan untuk memperpanjang umur vas bunga potong.

c. Manajemen Konstruktif untuk Tanaman

Dalam beberapa kasus, aplikasi senyawa yang menginduksi produksi etilen dapat dimanfaatkan untuk mengatur pembungaan atau gugurnya daun sebelum panen, sehingga membantu efisiensi pertanian.

2. Faktor Eksternal

Faktor lingkungan sangat memengaruhi regulasi pertumbuhan tanaman:

a. Faktor Cahaya:

Cahaya merupakan salah satu faktor eksternal yang paling penting dalam mempengaruhi regulasi pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Tanaman membutuhkan cahaya sebagai sumber energi utama untuk proses fotosintesis, yang menghasilkan glukosa sebagai bahan bakar utama bagi aktivitas metabolisme.

Spektrum Cahaya dan Efeknya pada Tanaman

Peran cahaya terhadap tanaman tidak hanya bergantung pada keberadaannya, tetapi juga pada panjang gelombang atau spektrum cahaya tertentu. Spektrum cahaya merah dan biru, misalnya, memiliki dampak besar terhadap pertumbuhan tanaman:

1) Cahaya Merah

Cahaya ini berperan penting dalam proses pembungaan dan pemanjangan batang. Fitokrom, yaitu pigmen tanaman yang sensitif terhadap cahaya merah, membantu mengatur siklus siang dan malam (fotoperiodisme).

2) Cahaya Biru

Cahaya biru membantu mengontrol pembukaan stomata dan mendorong pertumbuhan daun yang sehat. Cahaya ini juga diperlukan untuk merangsang pembelahan sel dan membuat tanaman tetap kokoh.

Intensitas Cahaya

Intensitas cahaya juga mempengaruhi laju fotosintesis. Cahaya yang terlalu kuat dapat menyebabkan

stres cahaya, yang mana klorofil dalam daun terdegradasi dan menghasilkan kerusakan pada jaringan tanaman. Sebaliknya, jika intensitas terlalu rendah, tanaman akan mengalami etiolasi, di mana batang menjadi lebih panjang tetapi lemah, dan daun berwarna pucat karena kurangnya klorofil.

Durasi Penerimaan Cahaya

Durasi cahaya, atau fotoperiode, memainkan peran dalam inisiasi pembungaan. Beberapa tanaman dikategorikan sebagai tanaman hari pendek (memerlukan malam panjang), tanaman hari panjang (memerlukan siang panjang), dan tanaman netral hari (tidak bergantung pada panjang cahaya).

Arah Cahaya dan Fototropisme

Tanaman memiliki kemampuan untuk mendeteksi arah datangnya cahaya, sebuah fenomena yang dikenal sebagai fototropisme. Hal ini memungkinkan tanaman untuk mengarahkan pertumbuhan batang dan daun menuju sumber cahaya. Fototropisme dikendalikan oleh hormon auksin yang akan terdistribusi ke sisi tanaman yang tidak terkena cahaya. Akibatnya, sel di sisi yang gelap akan memperpanjang diri lebih cepat, sehingga batang membengkok menuju cahaya.

Kualitas Cahaya dalam Lingkungan Buatan

Selain cahaya alami dari matahari, sumber cahaya buatan, seperti lampu LED, sering digunakan dalam pertanian modern, terutama dalam sistem pertanian indoor atau rumah kaca. Dengan memanipulasi panjang gelombang cahaya tertentu, petani dapat mengontrol aspek-aspek pertumbuhan tanaman seperti tinggi tanaman, warna daun, dan waktu berbunga.

Lampu dengan spektrum merah digunakan untuk mendorong berbunga, sementara lampu biru digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan vegetatif. Bahkan,

spektrum cahaya hijau yang sebelumnya dianggap tidak efektif, ternyata membantu meningkatkan penetrasi cahaya di dalam kanopi daun yang lebat.

b. Air:

Air adalah salah satu faktor utama dalam regulasi pertumbuhan tanaman. Keberadaan dan distribusi air yang tepat sangat penting bagi proses fisiologis tanaman, seperti fotosintesis, respirasi, dan transpirasi. Air juga berperan dalam menjaga tekanan turgor sel, sebagai medium transportasi nutrisi di dalam tanaman, dan sebagai pelarut berbagai senyawa kimia.

Sumber air untuk tanaman umumnya berasal dari air tanah yang diserap oleh akar melalui proses osmosis. Dari akar, air kemudian didistribusikan ke seluruh bagian tanaman melalui xilem. Proses ini sangat tergantung pada gradien potensial air antara tanah, akar, dan atmosfer. Jika potensi air di tanah terlalu rendah, tanaman dapat mengalami stres air, yang akhirnya akan berdampak pada laju pertumbuhan dan hasil panen.

Adapun beberapa fungsi krusial air pada regulasi pertumbuhan tanaman adalah:

1) Sebagai Komponen Struktural

Air memberikan kekakuan pada tanaman melalui tekanan turgor, yang mendukung struktur daun dan batang. Tanpa air yang cukup, tanaman akan layu dan tidak dapat berdiri tegak.

2) Fotosintesis

Air diperlukan dalam reaksi cahaya dari fotosintesis sebagai donor elektron untuk menghasilkan oksigen dan energi kimia dalam bentuk ATP dan NADPH. Proses ini adalah inti dari produksi biomassa tanaman.

3) Transportasi Nutrisi dan Zat Organik

Air bertindak sebagai medium transportasi untuk nutrisi esensial dari akar ke daun, serta untuk mengedarkan hasil fotosintesis, seperti gula dan asam amino, ke bagian tubuh tanaman yang membutuhkan.

4) Pengaturan Suhu

Melalui proses transpirasi, air membantu mengatur suhu tanaman pada kondisi lingkungan yang panas. Proses pendinginan ini melibatkan pelepasan uap air dari stomata daun.

c. Faktor Nutrisi:

Faktor nutrisi memegang peranan penting dalam regulasi pertumbuhan tanaman. Tanaman memerlukan sejumlah elemen nutrisi esensial yang terbagi menjadi dua kategori utama: makronutrien dan mikronutrien. Makronutrien dibutuhkan dalam jumlah besar dan meliputi nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K), sementara mikronutrien seperti besi (Fe), seng (Zn), dan tembaga (Cu) diperlukan dalam jumlah kecil tetapi tetap sangat vital bagi fungsi metabolisme tanaman.

Makronutrien dan Pengaruhnya

Makronutrien seperti nitrogen, fosfor, dan kalium memiliki dampak signifikan pada berbagai proses tanaman:

- 1) Nitrogen (N):** Komponen utama dalam klorofil dan protein, nitrogen terlibat dalam proses fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif. Kekurangan nitrogen dapat menghambat pertumbuhan daun dan batang.
- 2) Fosfor (P):** Membantu dalam pembentukan DNA, RNA, dan transfer energi melalui ATP. Fosfor sangat penting dalam pembentukan akar dan perkembangan bunga.
- 3) Kalium (K):** Berperan dalam pengaturan osmotik, membuka dan menutup stomata, serta meningkatkan daya tahan tanaman terhadap stres abiotik seperti kekeringan.

Mikronutrien dan Fungsinya

Walaupun dibutuhkan dalam jumlah kecil, mikronutrien memiliki peranan spesifik yang tak tergantikan, antara lain:

- 1) **Besi (Fe):** Penting untuk sintesis klorofil dan enzim terkait proses respirasi.
- 2) **Seng (Zn):** Membantu dalam sintesis hormon pertumbuhan seperti auksin.
- 3) **Tembaga (Cu):** Berperan dalam proses fotosintesis dan respirasi tanaman.

Kekurangan mikronutrien sering kali menyebabkan gejala yang khas, seperti klorosis (daun menguning) atau nekrosis (kematian jaringan tanaman).

Interaksi dan Kesimbangan Nutrisi

Selain kebutuhan individu terhadap nutrisi, keseimbangan antar nutrisi juga memainkan peran kritis bagi tanaman. Sebagai contoh, kelebihan salah satu elemen seperti nitrogen dapat mengurangi penyerapan elemen lain, seperti kalsium dan magnesium, sehingga menyebabkan defisiensi sekunder. Demikian pula, interaksi antara fosfor dan seng dapat memengaruhi ketersediaan masing-masing unsur di dalam tanah.

Sumber Nutrisi bagi Tanaman

Nutrisi bagi tanaman diperoleh terutama dari tanah. Unsur-unsur nutrisi ini tersedia melalui:

- 1) **Pupuk:** Pupuk organik (kompos, pupuk kandang) dan anorganik memberikan nutrisi esensial dalam bentuk yang langsung tersedia bagi tanaman.
- 2) **Sumber Alami:** Proses dekomposisi bahan organik menyediakan nutrisi secara lambat tetapi berkelanjutan.
- 3) **Biofertilizer:** Mikroorganisme seperti *Rhizobium* (nitrogen-fixing bacteria) membantu menyuplai nutrisi biologis ke dalam tanah.

d. Faktor Suhu:

Suhu merupakan salah satu faktor penting dalam regulasi pertumbuhan tanaman. Setiap tanaman memiliki rentang suhu ideal untuk pertumbuhan yang optimal. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menghambat proses fisiologis tanaman, seperti fotosintesis, respirasi, dan transpirasi.

Pada suhu optimal, enzim-enzim dalam tanaman bekerja pada efisiensi tertinggi, memungkinkan terjadinya berbagai reaksi biokimia yang mendukung pertumbuhan. Sebaliknya, suhu yang ekstrem dapat menyebabkan denaturasi enzim, sehingga mengganggu proses metabolisme. Misalnya, suhu tinggi dapat meningkatkan laju respirasi yang berlebihan, hingga mengurangi simpanan energi yang seharusnya digunakan untuk pertumbuhan.

Selain itu, suhu juga memengaruhi dormansi biji dan waktu perkecambahan. Beberapa jenis tanaman memerlukan suhu tertentu untuk memecahkan dormansi dan memulai proses pertumbuhan. Suhu juga memiliki peranan penting dalam pembungaan dan pemasakan buah. Tanaman tertentu memerlukan suhu dingin selama periode tertentu, yang dikenal dengan istilah "vernalisasi," untuk memicu pembungaan.

Dampak suhu terhadap pertumbuhan tanaman juga dipengaruhi oleh interaksi dengan faktor lingkungan lainnya, seperti cahaya, kelembapan, dan kadar karbon dioksida. Sebagai contoh, suhu tinggi disertai dengan kelembapan rendah dapat mengakibatkan stres air pada tanaman, menekan kemampuan transpirasi dan fotosintesis.

Pengaruh Suhu pada Tahap-Tahap Pertumbuhan Tanaman

1) Perkecambahan Biji

Suhu memegang peranan penting sejak awal pertumbuhan tanaman, yaitu pada tahapan

perkecambahan biji. Kebanyakan biji memerlukan suhu optimal tertentu untuk berkecambah. Misalnya, biji tanaman tropis biasanya tumbuh baik pada suhu antara 20-30°C. Suhu yang terlalu rendah dapat memperlambat proses imbibisi, yaitu penyerapan air oleh biji, sedangkan suhu terlalu tinggi dapat merusak jaringan embrio.

2) Pertumbuhan Vegetatif

Pada fase vegetatif, suhu optimal mendukung aktivitas metabolisme yang tinggi untuk mendukung pertumbuhan daun, batang, dan akar. Karena itu, tanaman yang tumbuh di suhu yang konsisten dalam rentang optimal biasanya memiliki daun yang hijau segar dan akar yang lebih kuat.

3) Pembentukan Bunga dan Buah

Suhu juga memengaruhi fase reproduktif tanaman. Sebagian besar tanaman memerlukan kondisi suhu tertentu untuk merangsang pembentukan bunga dan buah. Proses ini sering kali disebut dengan "vernalisasi" bagi tanaman yang memerlukan paparan suhu dingin sebelum berbunga, seperti gandum dan beberapa tanaman hias.

4) Pematangan Buah

Saat buah mulai matang, suhu berpengaruh terhadap kualitas dan kecepatan pemasakan. Suhu tinggi mempercepat pemasakan buah, tetapi terlalu tinggi dapat memengaruhi rasanya dan menyebabkan buah lebih cepat membusuk. Suhu yang tidak sesuai juga dapat menghambat pembuatan pigmen alami, seperti antosianin, yang memengaruhi warna buah (M.Ridhwan, 2023).

e. Faktor Geotropisme

Geotropisme adalah respons pertumbuhan tanaman terhadap gravitasi. Akar dan batang menunjukkan sifat geotropisme yang berbeda, yakni geotropisme positif dan negatif. Respons ini terjadi karena adanya distribusi zat

pengatur tumbuh (auksin) yang berbeda di setiap bagian tanaman, mempengaruhi arah pertumbuhan (Wei et al., 2024).

- 1) **Geotropisme Positif:** Adalah pertumbuhan dalam arah gravitasi, seperti yang terjadi pada akar. Akar tumbuh menuju bawah untuk mencari air dan mineral di dalam tanah.
- 2) **Geotropisme Negatif:** Adalah pertumbuhan melawan arah gravitasi, yang terjadi pada batang. Batang tumbuh menuju atas untuk mendapatkan lebih banyak cahaya untuk fotosintesis.

Respon geotropisme ini dipengaruhi oleh reseptor gravitasi yang dikenal sebagai statoliths, yaitu organel yang terkandung dalam sel tanaman. Statoliths mendeteksi gravitasi dan mengirimkan sinyal yang mempengaruhi distribusi auksin, menentukan ke mana akar dan batang akan tumbuh.

Mekanisme Geotropisme pada Akar (Geotropisme Positif)

Pada akar, geotropisme positif terjadi melalui mekanisme regulasi hormon auksin. Ketika akar mendeteksi gravitasi melalui statoliths yang terletak di sel-sel kaliptra, auksin akan didistribusikan ke bagian bawah akar. Namun, konsentrasi auksin yang tinggi pada akar memiliki efek yang berbeda dibandingkan batang. Auksin pada akar menghambat pemanjangan sel.

Prosesnya adalah sebagai berikut:

1. Statoliths dalam sel-sel akar bergeser mengikuti gravitasi.
2. Redistribusi hormon auksin terjadi, di mana konsentrasi lebih tinggi pada sisi bagian bawah akar.
3. Karena auksin menghambat pemanjangan pada akar, sisi atas akan tumbuh lebih cepat dibandingkan sisi bawah.
4. Hal ini menyebabkan akar membelok ke bawah, mengikuti arah gravitasi.

Akar tumbuh ke bawah untuk memastikan tanaman mendapatkan akses yang optimal terhadap air dan nutrisi di dalam tanah, yang diperlukan untuk pertumbuhan dan perkembangan.

Mekanisme Geotropisme pada Batang (Geotropisme Negatif)

Berbeda dengan akar, batang menunjukkan geotropisme negatif, yaitu pertumbuhan melawan arah gravitasi. Proses ini juga melibatkan auksin, tetapi dengan efek yang berlawanan dibandingkan pada akar. Auksin pada batang merangsang pemanjangan sel, sehingga memainkan peranan penting dalam memastikan batang tumbuh ke atas.

Proses geotropisme negatif pada batang mencakup:

1. Statoliths di batang bergeser ke sisi bawah sel, mendeteksi arah gravitasi.
2. Auksin berkumpul lebih banyak di sisi bawah batang akibat redistribusi hormon ini.
3. Konsentrasi auksin yang tinggi pada sisi bawah batang merangsang pemanjangan sel di area tersebut.
4. Akibatnya, sisi bawah batang tumbuh lebih cepat daripada sisi atas, sehingga batang melengkung ke atas melawan gravitasi.

Pertumbuhan melawan gravitasi ini penting bagi tanaman untuk mendapatkan lebih banyak cahaya matahari, yang dibutuhkan dalam fotosintesis untuk menghasilkan energi guna mendukung pertumbuhan.

9.4 Interaksi Faktor Hormon dan Lingkungan

Pertumbuhan tanaman adalah hasil sinergi antara faktor internal berupa hormon dan faktor eksternal seperti lingkungan. Kedua faktor ini berkolaborasi dalam membentuk pola pertumbuhan, adaptasi, dan perkembangan tanaman, sehingga tanaman dapat berfungsi optimal dalam berbagai kondisi (Benková, 2016).

Secara alami, hormon tumbuhan atau fitohormon bertindak sebagai pengendali utama dalam proses-proses fisiologis tanaman seperti pembelahan sel, pemanjangan sel, dan respons terhadap lingkungan. Hormon seperti auksin, giberelin, sitokinin, etilen, dan asam absisat memiliki peran spesifik yang unik tetapi saling terkait satu sama lain. Misalnya, auksin berperan dalam pembentukan akar dan pemanjangan batang, sementara sitokinin mendukung pembelahan sel serta memengaruhi pembukaan stomata.

Namun, regulasi hormonal ini tidak akan maksimal tanpa adanya pengaruh dari lingkup lingkungan seperti cahaya, suhu, air, serta keterpaduan faktor kimia seperti ketersediaan nutrisi dan pH tanah. Kombinasi ini menjadi faktor penentu apakah tanaman dapat mengoptimalkan potensi tumbuh kembangnya. Contohnya, cahaya matahari berinteraksi dengan fitokrom, receptor cahaya, untuk memengaruhi biosintesis hormon tertentu.

Faktor lingkungan dapat pula memantik atau menekan aktivitas hormon. Dalam kondisi stres, seperti kekeringan, asam absisat akan meningkatkan aktivitasnya untuk menekan transpirasi dan mencegah kehilangan air lebih lanjut. Sebaliknya, dalam lingkungan yang kondusif dengan suhu dan curah air yang cukup, aktivitas giberelin bisa mendominasi untuk mendorong pertumbuhan tunas dan daun secara maksimal.

Interaksi hormon dan lingkungan tidak hanya membentuk mekanisme langsung tetapi juga berdampak pada adaptasi tanaman terhadap kondisi buruk. Misalnya, dalam kondisi lingkungan dengan cahaya rendah, hormon auksin akan terdistribusi ke sisi tanaman yang jauh dari cahaya, menyebabkan pemanjangan batang di sisi tersebut (fenomena fototropisme). Hal ini memungkinkan tanaman untuk memperoleh cahaya secara optimal meskipun kondisi lingkungan tidak ideal.

Selain itu, suhu yang ekstrem baik terlalu rendah maupun terlalu tinggi, memengaruhi pola keseimbangan hormonal dalam jaringan tanaman. Suhu rendah dapat menghambat sintesis auksin, sementara suhu tinggi dapat mempercepat produksi hormon seperti etilen, yang sering dikaitkan dengan stres suhu atau pematangan cepat. Oleh karena itu, tanaman memiliki mekanisme yang sangat sensitif untuk merespons variasi lingkungan dengan mengatur komposisi hormonal secara spesifik.

Lebih lanjut, interaksi lingkungan dan hormon dapat dioptimalkan oleh manusia dalam praktis pertanian. Contohnya adalah penggunaan giberelin pada tanaman padi untuk

meningkatkan pemanjangan batang dalam kondisi genangan, atau pemberian hormon sitokinin pada tanaman hortikultura untuk mensimulasikan pembelahan sel dan memperbanyak tunas dalam kondisi tanah yang kurang subur. Praktik-praktik ini menunjukkan bahwa manusia bisa memanfaatkan interaksi ini untuk keuntungan agrikultur.

DAFTAR PUSTAKA

- Benková, E. (2016). Plant hormones in interactions with the environment. In *Plant Molecular Biology* (Vol. 91, Issue 6). <https://doi.org/10.1007/s11103-016-0501-8>
- Contreras, A., & Perea-Resa, C. (2024). Transcriptional repression across mitosis: mechanisms and functions. In *Biochemical Society Transactions* (Vol. 52, Issue 1). <https://doi.org/10.1042/BST20231071>
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., & Urban, L. (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. In *Plant, Cell and Environment* (Vol. 33, Issue 9). <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x>
- Khan Academy. (2019). Phases of mitosis | Mitosis | Biology (article) | Khan Academy. In <https://www.khanacademy.org/>.
- Sosnowski, J., Truba, M., & Vasileva, V. (2023). The Impact of Auxin and Cytokinin on the Growth and Development of Selected Crops. In *Agriculture (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/agriculture13030724>
- Stahl-Meyer, J., Holland, L. K. K., Liu, B., Maeda, K., & Jäättelä, M. (2022). Lysosomal Changes in Mitosis. *Cells*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/cells11050875>
- Taiz, L., Møller, I. M., Murphy, A., & Zeiger, E. (2023). Plant Physiology and Development. In *Plant Physiology and Development*. <https://doi.org/10.1093/hesc/9780197614204.001.0001>
- Waidmann, S., Ruiz Rosquete, M., Schöller, M., Sarkel, E., Lindner, H., LaRue, T., Petřík, I., Dünser, K., Martopawiro, S., Sasidharan, R., Novak, O., Wabnik, K., Dinneny, J. R., & Kleine-Vehn, J. (2019). Cytokinin functions as an asymmetric and anti-gravitropic signal in lateral roots. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11483-4>
- Wei, R., Ma, L., Lu, X., Xu, L., Feng, X., Ma, Y., Li, S., Ma, S., Chai, Q., Zhang, X., & Yang, X. (2024). Research advances in plant root geotropism. In *Plant Growth Regulation* (Vol. 102, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s10725-023-00992-4>

BIODATA PENULIS



Oktaviani, S.P., M.Si.

Dosen Program Studi Proteksi Tanaman
Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya

Oktaviani, S.P., M.Si. merupakan alumnus dengan predikat lulus tercepat dan alumni terbaik Fakultas Pertanian Universitas Sriwijaya 2019 dan sebagai lulusan terbaik Program Pascasarjana Entomologi di Fakultas Pertanian Institut Pertanian Bogor 2022. Penulis kelahiran Palembang, 31 Oktober 1998 ini merupakan peraih Juara 3 Lomba Essay Pergerakan se-Sumatra Selatan 2017 diselenggarakan oleh BEM KM FT UNSRI. Penulis terpilih menjadi penerima Fully Funded program Indonesian Youth Social Expedition (IYSE) di Pulau Pari Kepulauan Seribu sebagai Koordinator Divisi Lingkungan Hidup 2018, dan terpilih kembali menjadi Koordinator Divisi Lingkungan pada Eskpedisi Sapa Papua di Pulau Friwen Raja Ampat 2021. Penulis mendirikan NGO Pemuda Penggerak Bangsa (P2B) dengan proyek sosial “TANPA BATAS (Tangan Pemuda Bersama Disabilitas) di SLB Negeri Ogan Ilir, Sumatera Selatan 2018-2019. Penulis adalah Asisten Dosen di Proteksi Tanaman IPB dan berkesempatan tergabung dalam grup yang dinobatkan Best Group program PARE (Population, Activities, Resources, Environment) Spring School 2022. Penulis aktif di Liaison Office Hokkaido University in Indonesia hingga 2022. Penulis berprofesi sebagai dosen tetap (ASN) di Universitas Sriwijaya sejak 2023-sekarang.

BIODATA PENULIS



Juhardi Sembiring, S.Si., M.Si.

Dosen Program Studi Budidaya Pertanian

Fakultas Pertanian Universitas Nahdlatu Ulama Sumatera Utara

Penulis lahir di Medan pada tanggal 10 Agustus 1990. Penulis merupakan Alumni Sarjana pada Program Studi Biologi Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Sumatera Utara (USU) yang lulus pada tahun 2013. Pada tahun yang sama penulis mendapatkan kesempatan untuk melanjutkan studi melalui program Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN) dari Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan di Program Studi Biosains Hewan Institut Pertanian Bogor (IPB) dan menyelesaikan studinya pada tahun 2015. Penulis saat ini merupakan Dosen untuk bidang keahlian Biologi pada Program Studi Budidaya Pertanian Universitas Nahdlatul Ulama Sumatera Utara sejak tahun 2016. Sebagai seorang yang sepenuhnya mengabdikan diri sebagai dosen, selain pendidikan formal yang ditempuh, penulis juga aktif mengikuti berbagai pelatihan untuk meningkatkan kinerja dosen khususnya di bidang pengajaran, penelitian dan pengabdian. Pada tahun 2018 tercatat juga pernah mendapatkan Hibah Penelitian dari KEMENRISTEK DIKTI melalui program Hibah Penelitian Dosen Pemula. Penulis saat ini aktif juga sebagai tenaga ahli dalam advokasi, penelitian dan proyek terkait dengan kelestarian lingkungan hidup yang bekerjasama dengan berbagai Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM), Pemerinta Provinsi

dan Balai Konservasi dan Sumber Daya Alam (BKSDA) Sumatera Utara. Berbagai karya Penelitian telah dihasilkan dan dimuat dalam jurnal ilmiah. Penulis juga aktif menjadi pemakalah dan narasumber pada workshop dan seminar bidang lingkungan hidup.

BIODATA PENULIS



Didi Carsidi, S.TP., M.P.

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Wiralodra

Penulis lahir di Indramayu tanggal 17 Maret 1987. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Wiralodra. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Teknologi Pertanian Program Studi Teknik Pertanian (2005-2010) dan melanjutkan S2 pada Magister Agronomi Universitas Jenderal Soedirman (2018-2020). Penulis menekuni bidang pertanian (Agroteknologi). Nomer WA: 082129962903 dan Email: didi@unwir.ac.id.

BIODATA PENULIS



Dr. Alianto, S.Pi, M.Si.

Dosen Program Studi S2 Sumberdaya Akuatik,
Pascasarjana, Universitas Papua

Penulis lahir di Wanci pada tanggal 5 Maret 1970. Penulis merupakan dosen tetap pada Program Studi Sumberdaya Akuatik, Pascasarjana, Universitas Papua. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Manajemen Sumberdaya Perairan, Universitas Pattimura dan melanjutkan S2 dan S3 pada Program Studi Ilmu Perairan, Institut Pertanian Bogor. Penulis mengajar mata kuliah Planktonologi, Pengendalian Pencemaran dan Eutrofikasi Perairan, Kuliatas Air, Produktivitas Perairan pada Program Studi S1 Manajemen Sumberdaya Perairan dan mata kuliah Produktivitas dan Eutrofikasi Perairan serta Konservasi Sumberdaya Perairan pada Program Studi S2 Sumberdaya Akuatik, Pascasarjana, Universitas Papua. Penulis aktif pula sebagai penulis buku yang diterbitkan oleh penerbit nasional dan artikel yang dipublikasikan pada jurnal nasional, nasional terakreditasi kemdikbud, internasional dan internasional bereputasi. Karya tulis penulis tersedia secara berturut-turut di website pada link berikut: https://scholar.google.co.id/citations?user=k9_r9PMAAAAJ&hl=en
<https://www.researchgate.net/profile/Dr-Alianto-2>
<https://sinta.kemdikbud.go.id/authors/profile/6646035>

BIODATA PENULIS



apt Hendri Satria kamal Uyun M.Farm

Dosen Program Studi S1 Farmasi

Sekolah Tinggi Ilmu Farmasi Padang (STIFARM Padang)

Penulis lahir di Tanjung Pinang tanggal 9 Agustus 1993. Penulis adalah dosen tetap pada bidang Biologi Farmasi STIFARM Padang. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 Farmasi Pada Sekolah Tinggi Farmasi Indonesia Perintis Padang kemudian melanjutkan pendidikan Profesi Apoteker Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas dan melanjutkan Pendidikan S2 Di Fakultas Farmasi Universitas Andalas. Mata kuliah yang diampu antara lain Botani Farmakognosi 1, Farmakognosi 2 dan Fitokimia. Penulis juga telah menerbitkan buku diantaranya adalah Farmakognosi, Ilmu bahan Makanan dan Ilmu pangan. Selama menjalankan tridarma perguruan tinggi dibidang penelitian, penulis berhasil mendapatkan hibah untuk Penelitian Dosen Pemula oleh Kemdikbudristek Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi, Direktorat Riset, Teknologi dan Pengabdian Kepada Masyarakat sebagai pemberi dana penelitian tahun 2023 dan 2024. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada STIFARM Padang atas dukungannya dalam penulisan dan penerbitan buku ini.

BIODATA PENULIS



Nonci M. Uki, M.Pd.

Dosen Program Studi Pendidikan Biologi
Institut Pendidikan Soe

Penulis lahir di Fatujak tanggal 7 November 1989. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Pendidikan Biologi, Institut Pendidikan Soe. Menyelesaikan pendidikan S1 di Program Studi Pendidikan Biologi Universitas Timor (Unimor) tahun 2013 dan melanjutkan S2 di Program Studi Pendidikan IPA Konsentrasi Biologi Universitas Negeri Semarang (Unnes) tahun 2015. Saat ini penulis dipercayakan untuk mengampuh Mata Kuliah Fisiologi Tumbuhan, Statistik dan Pendidikan Lingkungan Hidup.

BIODATA PENULIS



Saraswati Prabawardani

Dosen Program Studi Agroteknologi
Jurusan Budidaya Pertanian
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis bekerja sebagai Dosen pada Fakultas Pertanian, Universitas Papua. Penulis telah mendedikasikan waktu, tenaga dan pikiran dalam dunia pendidikan selama 36 tahun, sejak tahun 1988. Penulis menyelesaikan S1 bidang Agronomi pada Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih tahun 1986, S2 bidang Agronomi pada University of the Philippines Los Baños tahun 2005, S3 pada bidang Ekofisiologi Tanaman James Cook University, Australia tahun 2008. Bidang kajian yang ditekuni penulis adalah Agronomi dan Ekofisiologi Tanaman. Penulis berperan aktif dalam menulis karya ilmiah pada jurnal Nasional terakreditasi dan Internasional bereputasi, dalam seminar ilmiah baik Nasional maupun Internasional, dan menghasilkan beberapa karya ilmiah dalam Prosiding Nasional dan Prosiding Internasional terindeks, jurnal Nasional Pengabdian kepada Masyarakat terakreditasi, dan beberapa buku referensi dan buku ajar.

Email: danysaraswati@gmail.com; s.prabawardani@unipa.ac.id

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Abdullah Sarijan., MP

Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Musamus

Penulis lahir di Fak-fak, tanggal 09 Oktober 1964. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, Universitas Musamus. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Budidaya Pertanian (Agronomi) Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih, melanjutkan S2 pada program studi Sistem-Sistem Pertanian (Tanaman) Universitas Hasanuddin, dan menyelesaikan S3 pada Program Studi Ilmu dan Teknologi Benih di Institut Pertanian Bogor. Penulis aktif sebagai pengelola maupun sebagai reviewer Jurnal Nasional (*Agricola*, *Integrated and Sustainable Agriculture*, *Musamus Journal Of Agrotechnology research*). Sebagai dosen, penulis mengampu beberapa matakuliah diantaranya: metodologi penelitian, rancangan percobaan, teknik budidaya tanaman sereal, teknik budidaya tanaman legum, teknologi benih, dasar-dasar perlindungan tanaman.